

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO E VERIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS  
DE ENTRADA NO BRUNIMENTO DE CURSO LONGO DO TIPO  
"PRECIDOR"**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**RICARDO MACHADO PERES**

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1994

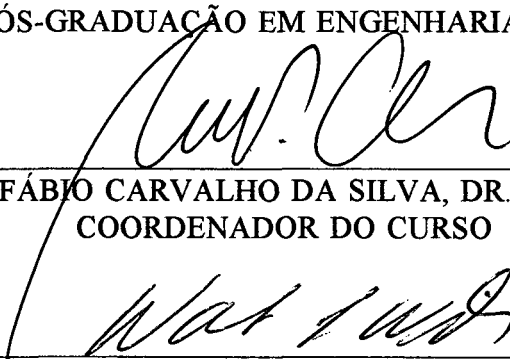
CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO E VERIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS DE  
ENTRADA NO BRUNIMENTO DE CURSO LONGO DO TIPO "PRECIDOR"

RICARDO MACHADO PERES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



---


PROF. ANTÔNIO FÁBIO CARVALHO DA SILVA, DR. - ENG<sup>a</sup>. MECÂNICA  
COORDENADOR DO CURSO



---

PROF. DR.-ING. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER  
ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA



---

PROF. ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JR., DR. - ENG<sup>a</sup>. MECÂNICA



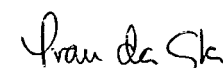
---

PROF. LOURIVAL BOEHS, DR. - ENG<sup>a</sup>. MECÂNICA



---

PROF. DR.-ING. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER



---

ENG. IVAN DA COSTA FILHO

Aos meus Pais  
e ao meu Irmão

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antônio de Souza Peres e Salete Machado Peres, que sempre me apoiaram e auxiliaram em todos os momentos de minha vida, especialmente durante o período de desenvolvimento do meu mestrado.

Ao Prof. Dr. - Ing. Walter Lindolfo Weingarertner, pela amizade, exemplo, dedicação e orientação no trabalho.

À CAPES e CNPQ - Programa RHAIE - Mecânica de Precisão, pela concessão das bolsas de estudo e recursos que viabilizaram este trabalho.

À EMBRACO pelo apoio dado na realização de todos os ensaios aqui apresentados.

Ao M. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, pelo exemplo de organização, amizade e dedicação.

Aos irmãos Joel Martins Crichigno Filho e Daniel Hioki pela presença constante e cooperação inestimável.

Ao amigo e colega Durval João De Barba Jr, pela colaboração nos difíceis momentos da realização dos ensaios e pela dedicação e empenho na execução dos desenhos.

Ao Eng. Ivan da Costa Filho, amigo sempre disposto a auxiliar.

Ao mestrando Aloísio José Schuitek, pelas críticas favoráveis e construtivas.

Ao mestrando João Carlos Lopes, pela prestatividade e críticas positivas.

Aos amigos Irapuan dos Santos e Yara Lemr, pelo auxílio na correção do trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica, Alessandro Besen Barbosa, Alexandre Hildes G. Ramos, Fernando Cúrcio, Hewerson Ranieri da Silva, Isaias Masiero Filho, Juliano Sherner Rossi, Aroldo Osis, Luis Henrique Figueiredo, Manfred Molz, Maurício Cappra Pauletti, Oliver Odebrecht, Régis Scapini Marques, Ricardo Vieira Antunes, mais do que colaboradores, amigos dedicados nos mais diversos trabalhos executados.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente me auxiliaram, possibilitando a execução deste trabalho, o meu muito obrigado.

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>ÍNDICE</b> .....	v
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>SIMBOLOGIA</b> .....	xvii
<b>RESUMO</b> .....	xix
<b>ABSTRACT</b> .....	xx
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
<b>3. ESTADO DA ARTE DO BRUNIMENTO</b> .....	4
3.1. HISTÓRICO DO BRUNIMENTO .....	4
3.2. USINAGEM COM GUMES DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA .....	6
3.2.1. Forma Média dos Gumes de Geometria não Definida .....	6
3.2.2. Princípio de Atuação dos Processos de Geometria não Definida .....	7
3.2.3. Tempo Específico de Contato do Grão .....	9
3.2.4. Penetração do Gume e Formação de Cavaco no Brunimento .....	9
3.2.5. Desgaste do Abrasivo e do Ligante .....	11

	vi
3.3.1. Materiais Abrasivos	13
- Carboneto de silício (SiC)	13
- Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )	14
- Nitreto de boro cúbico (CBN)	15
- Diamantes	16
3.3.2. Ligantes	17
- Ligantes orgânicos	17
- Ligantes inorgânicos	18
- Ligantes cerâmicos ou vitrificados	19
3.3.3. Especificação da Pedra de Brunir	19
- Granulometria do abrasivo	19
- Dureza da pedra de brunir	20
- Estrutura da pedra de brunir	21
- Concentração	21
- Designação da pedra de brunir	22
3.4. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO	24
3.4.1. Brunimento de Curso Longo	24
- Brunimento eletroquímico	25
3.4.2. Brunimento de Curso Curto:	26
- Brunimento de curso curto entre pontas	26
- Brunimento "center-less" de mergulho	27
- Brunimento de superfícies planas	28
- Brunimento de perfis especiais	29
3.5. CINEMÁTICA DOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO	30
3.5.1. Cinemática do brunimento de curso longo	30
3.5.2. Cinemática do Brunimento de Curso Curto	30

3.6. ASPECTOS GERAIS SOBRE AS FERRAMENTAS DE BRUNIMENTO . . .	33
3.6.1. Forma construtiva das ferramentas de brunir . . . . .	33
- Ferramentas de pedra única . . . . .	33
- Ferramentas de múltiplas pedras . . . . .	34
- Ferramentas de casca . . . . .	35
- Ferramentas maciças . . . . .	36
- Ferramentas "Precidor" . . . . .	36
• Construção da ferramenta "Precidor" . . . . .	37
• Cinemática do processo de brunimento "Precidor" . . . . .	38
• Características do processo e resultados obtidos . . . . .	38
3.6.3. Sistemas de Expansão das Ferramentas de Brunir . . . . .	39
- Expansão por acionamento mecânico . . . . .	40
- Expansão por acionamento hidráulico . . . . .	40
3.6.2. Preparação das Ferramentas de Brunir . . . . .	41
- Brasagem . . . . .	42
- Retificação . . . . .	42
- Afiação . . . . .	43
3.6.4. Dispositivos de Fixação Peça-Ferramenta . . . . .	44
- Dispositivo flutuante . . . . .	44
- Dispositivo cardânico . . . . .	44
- Dispositivo rígido . . . . .	45
3.7. GRANDEZAS DE ENTRADA NO PROCESSO DE BRUNIMENTO . . . . .	46
3.7.1. - Generalidades . . . . .	46
- Grandezas de entrada variáveis . . . . .	46
- Grandezas de entrada do sistema . . . . .	46
3.7.2. Pressão de Contato . . . . .	46
- Influência da pressão de contato na força de brunimento . . . . .	48

- Influência da pressão de contato na taxa de brunimento . . . . .	50
- Influência da pressão de contato na qualidade superficial . . . . .	51
- Influência da pressão de contato no desgaste da ferramenta . . . . .	52
- Influência da pressão de contato na forma resultante . . . . .	53
3.7.3. Velocidade de Corte . . . . .	54
- Influência da velocidade de corte na taxa de brunimento . . . . .	54
- Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta . . . . .	57
- Influência da velocidade de corte na qualidade superficial . . . . .	58
- Influência da velocidade de corte na forma resultante . . . . .	59
3.7.4. Comprimento do curso . . . . .	59
- Furos cegos com sangramento . . . . .	61
- Furos cegos sem sangramento . . . . .	61
3.7.5. Tempo de Brunimento . . . . .	62
- Influência do tempo de brunimento na qualidade superficial . . . . .	62
- Influência do tempo de brunimento na taxa de remoção . . . . .	62
- Influência do tempo de brunimento no desgaste da ferramenta . . . . .	62
3.7.6. Ferramentas . . . . .	64
- Influências da geometria da ferramenta . . . . .	64
- Influência do tamanho de grão . . . . .	65
- Influência da concentração de grãos . . . . .	66
- Influência da dureza do grão . . . . .	67
3.7.7. Qualidade Inicial da Peça . . . . .	67
3.7.8. Fluidos de corte . . . . .	68
- Composição do fluido de corte para brunimento . . . . .	69
- Viscosidade do lubrificante . . . . .	69
- Propriedades exigidas para um fluido de corte . . . . .	70
•Capacidade de lavação . . . . .	70



•Capacidade de refrigeração .....	70
•Capacidade de lubrificação .....	71
3.8. SUPERFÍCIES GERADAS NO BRUNIMENTO .....	72
3.8.1. Generalidades .....	72
3.8.2. Superfícies de Deslizamento .....	72
3.8.3. Análise de uma superfície usinada .....	73
3.8.4. Parâmetros empregados na caracterização superficial .....	73
3.8.5. Curva de Abbot .....	74
3.8.6. Superfícies Brunidas .....	75
3.8.7. Brunimento de "Plateau" .....	76
<b>4. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>78</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	78
4.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS .....	79
4.2.1. Análise de Variância .....	79
4.2.2. Técnicas de Taguchi para Análise de Resultados .....	82
4.3. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA .....	83
4.3.1. Variáveis Envolvidas no Ensaio de Força .....	83
4.3.2. Variáveis Envolvidas no Estudo dos Resultados do Trabalho .....	83
4.4. DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA .....	84
4.4.1. Níveis das Variáveis no Ensaio de Força .....	84
4.4.2. Níveis das variáveis no ensaio dos resultados do trabalho .....	85
4.5. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ ORTOGONAL .....	88
4.6. INFRAESTRUTURA DA EXPERIMENTAÇÃO .....	89
4.6.1. Máquina-Ferramenta .....	89
4.6.2. Ferramentas .....	89
4.6.3. Sistema de medição de forças .....	90

4.6.4. Equipamentos auxiliares . . . . .	90
4.6.5. Corpos de Prova . . . . .	91
4.6.6. Dispositivos de Fixação . . . . .	92

## **5.FORÇAS DE BRUNIMENTO**

<b>VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS . . . . .</b>	<b>95</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	95
5.2. METODOLOGIA DO ENSAIO . . . . .	95
5.2.1. Desenvolvimento do Experimento . . . . .	95
- Seleção e classificação dos corpos de prova . . . . .	96
- Determinação do diâmetro da ferramenta . . . . .	97
- Operação do sistema de medição de forças . . . . .	98
5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORÇA . . . . .	98
5.3.1. Comportamento Característico da Ff e do Mt no Brunimento . . . . .	98
5.4. Análise dos resultados . . . . .	101
5.4.1. Ff e Mt em Função da Sobremedida com Ferramenta D50 . . . . .	102
5.4.2. Ff e Mt em Função da Sobremedida com ferramenta D150 . . . . .	107
5.4.3. Análise Comparativa . . . . .	113

## **6.GRANDEZAS DE ENTRADA INFLUENTES NO BRUNIMENTO**

<b>VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS . . . . .</b>	<b>117</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS . . . . .	117
6.2. METODOLOGIA DO ENSAIO . . . . .	117
6.2.1. Desenvolvimento do Experimento . . . . .	118
- Seleção e Classificação dos Corpos de Prova . . . . .	118
- Montagem da matriz experimental . . . . .	119
•Matriz da primeira etapa de ensaios . . . . .	119

•Matriz da segunda etapa de ensaios . . . . .	121
<b>6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS GRANDEZAS DE ENTRADA . . .</b>	<b>122</b>
6.2.1. Resultados da Primeira Etapa de Ensaios . . . . .	122
6.2.2. Resultados da Segunda Etapa de Ensaios . . . . .	123
<b>6.4. ANÁLISE DE RESULTADOS . . . . .</b>	<b>124</b>
6.4.1. Análise dos Resultados da Primeira Etapa . . . . .	124
6.4.2. Análise dos Resultados da Segunda Etapa . . . . .	127
<b>7.CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>138</b>
<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>145</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 3

<b>Figura 3.1</b> - Forma média dos grãos [16] .....	7
<b>Figura 3.2</b> - Formas de penetração do gume [1] .....	8
<b>Figura 3.3</b> - Tempo de contato como função do processo [20] .....	9
<b>Figura 3.4</b> - Representação esquemática da remoção no brunimento .....	10
<b>Figura 3.5</b> - Formas dos cavacos resultantes no brunimento [16] .....	11
<b>Figura 3.6</b> - Desgaste dos grãos abrasivos convencionais [20] .....	11
<b>Figura 3.7</b> - Desgaste da ferramentas de diamante e CBN [38] .....	12
<b>Figura 3.8</b> - Esquema para designação de uma pedra de brunir DIN - 69.186 [1:6] .....	22
<b>Figura 3.9</b> - Designação de uma pedra diamantada .....	23
<b>Figura 3.10</b> - Brunimento de curso longo .....	24
<b>Figura 3.11</b> - Brunimento eletroquímico [31] .....	25
<b>Figura 3.12</b> - Brunimento entre pontas [4] .....	26
<b>Figura 3.13</b> - Brunimento "center-less" de passagem [16] .....	27
<b>Figura 3.14</b> - Brunimento "center-less" de mergulho [16] .....	28
<b>Figura 3.15</b> - Brunimento plano [16] .....	28
<b>Figura 3.16</b> - Brunimento de perfis [30] .....	29
<b>Figura 3.17</b> - Cinemática para o brunimento de curso longo [ 1 ] .....	30
<b>Figura 3.18</b> - Velocidades no brunimento de curso curto .....	30
<b>Figura 3.19</b> - Cinemática para o brunimento de curso curto .....	31
<b>Figura 3.20</b> - Ferramenta de pedra única [1] .....	34
<b>Figura 3.21</b> - Ferramentas de múltiplas pedras [2] .....	34
<b>Figura 3.22</b> - Ferramentas de casca .....	35

<b>Figura 3.23</b> - Ferramentas maciças .....	36
<b>Figura 3.24</b> - Ferramenta "Precidor" e régua diamantada .....	37
<b>Figura 3.25</b> - Cinemática do brunimento "Precidor" .....	38
<b>Figura 3.26</b> - Remoção e rugosidade obtidas em múltiplos estágios de brunimento .....	38
<b>Figura 3.27</b> - Expansão por haste cônica (a), cones (b) e cunha (c) .....	39
<b>Figura 3.28</b> - Sistema de expansão mecânica .....	40
<b>Figura 3.29</b> - Sistema de expansão hidráulico .....	40
<b>Figura 3.30</b> - Esquema do medidor pneumático de diâmetro [36] .....	41
<b>Figura 3.31</b> - Dispositivo flutuante .....	44
<b>Figura 3.32</b> - Dispositivo cardânico .....	44
<b>Figura 3.33</b> - Dispositivo rígido .....	45
<b>Figura 3.34</b> - Componentes da força de corte no brunimento [43] .....	47
<b>Figura 3.35</b> - Forças e pressão em sistemas hidráulicos [30] .....	47
<b>Figura 3.36</b> - Força de corte em função da pressão de contato [1] .....	49
<b>Figura 3.37</b> - Relação entre força de corte e pressão de contato no tempo [44] .....	49
<b>Figura 3.38</b> - Influência da pressão de contato na taxa de brunimento [42] .....	51
<b>Figura 3.39</b> - Rugosidade em dependência da pressão de contato [1] .....	52
<b>Figura 3.40</b> - Desgaste da ferramenta em função da pressão de contato [1] .....	53
<b>Figura 3.41</b> - Influência da pressão de contato sobre os erros de forma [1] .....	54
<b>Figura 3.42</b> - Influência da velocidade na taxa específica de brunimento [12] .....	55
<b>Figura 3.43</b> - Influência da composição da velocidade na taxa de remoção [42] .....	56
<b>Figura 3.44</b> - Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta [1] .....	57
<b>Figura 3.45</b> - Influência da relação da velocidade sobre a rugosidade [1] .....	58
<b>Figura 3.46</b> - Situações extremas da influência do curso na forma do furo .....	60
<b>Figura 3.47</b> - Correção dos defeitos do brunimento pela adequação do curso [23] .....	60
<b>Figura 3.48</b> - Correção da cilindridade no brunimento de furos cegos [55]. .....	61
<b>Figura 3.49</b> - Remoção de material em função do tempo de trabalho [1] .....	63

<b>Figura 3.50</b> - Influência do comprimento da ferramenta no erro de cilindridade [8] . . . .	64
<b>Figura 3.51</b> - Influência da largura da ferramenta sobre o erro de circularidade [8] . . . . .	65
<b>Figura 3.52</b> - Desvio de forma e rugosidade em função do tamanho de grão [1] . . . . .	66
<b>Figura 3.53</b> - Perfis teóricos e suas Curvas de Abbot . . . . .	75
<b>Figura 3.54</b> - Estrutura do brunimento precisor e convencional . . . . .	76
<b>Figura 3.56</b> - Brunimento de acabamento . . . . .	76
<b>Figura 3.55</b> - Brunimento de "Plateau" . . . . .	76

## CAPÍTULO 4

<b>Figura 4.1</b> - Desvio de forma inicial das peças . . . . .	84
<b>Figura 4.2</b> - Montagem do sistema de medição de forças . . . . .	90
<b>Figura 4.3</b> - Croquis do bloco rotativo . . . . .	92
<b>Figura 4.4</b> - Croquis do bloco EM . . . . .	92
<b>Figura 4.5</b> - Dispositivo de fixação do bloco Rotativo . . . . .	93
<b>Figura 4.6</b> - Dispositivos de fixação do bloco EM . . . . .	94

## CAPÍTULO 5

<b>Figura 5.1</b> - Esquema do medidor pneumático . . . . .	96
<b>Figura 5.2</b> - Deformação da ferramenta durante o brunimento . . . . .	97
<b>Figura 5.3</b> - Deslocamento da ferramenta em relação á peça . . . . .	98
<b>Figura 5.4</b> - Gráficos de Ff e Mt para ferramenta D50 . . . . .	99
<b>Figura 5.5</b> - Gráficos de Ff e Mt para ferramenta D150 . . . . .	99
<b>Figura 5.6</b> - Força de avanço em função da sobremedida para os erros de forma do tipo A, B e C . . . . .	104
<b>Figura 5.7</b> - Dispersão dos resultados da força de avanço para ferramenta D50 . . . . .	105

<b>Figura 5.8 - Momento torçor em função da sobremedida para os erro de forma do tipo</b>	
A, B e C .....	106
<b>Figura 5.9 - Dispersão dos resultados do momento torçor para ferramenta D50 .....</b>	107
<b>Figura 5.10- Força de avanço em função da sobremedida para os erros de forma do tipo</b>	
A, B e C .....	110
<b>Figura 5.11 - Dispersão da força de avanço para a ferramenta D150 .....</b>	111
<b>Figura 5.12- Momento torçor em função da sobremedida para os erros de forma do tipo</b>	
A, B e C .....	112
<b>Figura 5.13 - Dispersão do momento torçor para a ferramenta D150 .....</b>	112
<b>Figura 5.14 - Evolução da força de avanço com a sobremedida para ferramenta D50 ...</b>	113
<b>Figura 5.15 - Evolução da força de avanço com a sobremedida para ferramenta D150 ..</b>	114
<b>Figura 5.16 - Evolução do momento torçor com a sobremedida para ferramenta D50 ...</b>	115
<b>Figura 5.17 - Evolução do momento torçor com a sobremedida para ferramenta D150 ..</b>	116

## CAPÍTULO 6

<b>Figura 6.1 - Seções de medição do bloco EM .....</b>	119
<b>Figura 6.2 - Relação entre a cilindridade e as grandezas de entrada .....</b>	124
<b>Figura 6.3 - Relação entre a rugosidade e as grandezas de entrada .....</b>	125
<b>Figura 6.4 - Relação entre a remoção e as grandezas de entrada .....</b>	127
<b>Figura 6.5 - Relação entre a cilindridade e as grandezas de entrada .....</b>	128
<b>Figura 6.6 - Cilindridade de um corpo de prova antes e após o brunimento .....</b>	129
<b>Figura 6.7 - Relação entre a rugosidade e as grandezas de entrada .....</b>	130
<b>Figura 6.8 - Relação entre a circularidade e as grandezas de entrada .....</b>	131
<b>Figura 6.9 - Circularidade de uma peça antes e após o brunimento .....</b>	133
<b>Figura 6.10 - Relação entre a remoção e as grandezas de entrada .....</b>	133

## SIMBOLOGIA

SÍMBOLO	UNIDADE	DENOMINAÇÃO
$\alpha$	°	ângulo de cruzamento
$\alpha$	°	ângulo de incidência
$A_e$	mm <sup>2</sup>	área do êmbolo
$A_p$	mm <sup>2</sup>	área da pedra de brunir
$A_s$	mm <sup>2</sup>	área ativa da pedra de brunir
$\beta$	°	ângulo de cone
$\beta$	°	ângulo de cunha
DM		dispersão da medição
$D_{me}$	μm	diâmetro médio de grão
$\Delta r_l$	μm	variação radial da pedra
$\Delta V_m$	mm <sup>3</sup>	volume de material removido
F	N	força de corte
$F_e$	N	força hidráulica do êmbolo
$F_f$	N	força de avanço
$F_p$	N	força normal
$F_t$	N	força tangencial
$\gamma$	°	ângulo de saída
h	mm	amplitude de oscilação
$h_{cu}$	μm	espessura de usinagem
$h_{cu\ ef}$	μm	espessura efetiva



$i_e$		linha de corte
$L_l$	mm	comprimento de curso
$L_u$	mm	comprimento livre da ferramenta
$L_w$	mm	comprimento da peça
$M_t$	N.cm	momento torçor
$n$		número de pedras de brunir
$P_l$	Pa	pressão de contato
$P_e$	Pa	pressão hidráulica
$R_a$	$\mu\text{m}$	rugosidade
$R_t$	$\mu\text{m}$	rugosidade
$R_z$	$\mu\text{m}$	rugosidade
$S_{\max}$	$\mu\text{m}$	sobremedida máxima
$t$	s	tempo de brunimento
$T_c$	s	tempo de processo
$T_k$	s	tempo de contato
$T_{\infty}$	$\mu\text{m}$	profundidade de início de corte
$t_p$		perfil de suporte
$v_a$	mm/min	velocidade de avanço
$v_c$	m/min	velocidade de corte resultante
$v_r$	m/min	velocidade de posicionamento
$v_u$	m/min	velocidade tangencial
$\omega$	rad/s	velocidade angular
$y$	mm	curso de oscilação
$Z'$	$\text{mm}^3/\text{s}.\text{mm}^2$	taxa de brunimento

## RESUMO

Neste trabalho são estudadas as características tecnológicas do processo de brunimento do tipo "Precidor". Este processo é uma variante do brunimento de curso longo, diferenciando-se por uma elevada remoção de material em um único ciclo da ferramenta de corte.

Na primeira etapa de estudo, são analisados os esforços de corte gerados durante o processo, com o emprego de duas ferramentas diamantadas de diferentes granulometrias. O estudo do comportamento da força de avanço e do momento torçor levou a constatação que o perfil e a magnitude dos esforços, registrados no desenrolar do brunimento, está associado ao deslocamento das diversas regiões da ferramenta, em relação à peça. Mais especificamente, observou-se que alterações na sobremedida e na forma inicial da peça, modificam as características de força e de momento. A análise destes esforços permite, ainda, inferir sobre os fenômenos que regem o processo, já que para determinada condição pode haver um domínio do atrito ou do corte.

Na etapa posterior do trabalho, estuda-se a influência das diversas grandezas de entrada, do processo de brunimento, sobre os resultados do trabalho. Observa-se como a sobremedida de material, o desvio de forma e a rugosidade inicial da peça, o curso, a rotação e o avanço da ferramenta agem sobre as qualidades geométrica e superficial das peças brunidas.

Esta análise é efetuada mediante a implementação de técnicas Taguchi para a execução de experimentos, o que possibilita investigar o efeito gerado por cada um dos fatores isoladamente, bem como pela interação entre dois ou mais deles.

## ABSTRACT

In this work the technological features of the "Precidor" honing process are studied. This is a variation of the long stroke honing process, and the main difference to conventional honing is the heavy stock removal in one cycle of the honing tool.

In the first part of this work, the shearing forces generated during the process are analysed for two diamond tools with different grain sizes.

The study of the thrust force behaviour stated that the characteristics of the efforts registered during the honing process, are associated to the position of the tool, in reference to the workpiece. It was observed that alterations on stock removal and in the initial shape of the hole change the features of forces and moment. The analysis of these efforts allows to infer on the (friction and cutting) phenomenons that rule the process.

In the second part of the work the influence of the diverse input data of the honing process are correlated to the result of the work. It is observed, that the stock removal, the form deviation and initial roughness, the stroke, rotation and feed of the tool have an influence on the macro and micro geometrical quality of the workpieces.

The analysis is done using Taguchi technics to determine the experiments, that allow to investigate the effect generated for each one of the factors isolated, as well as the effects generated for the interaction of two or more of them.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

O processo de brunimento de curso longo traz, em seu desenvolvimento uma grande contribuição para a usinagem de precisão, que é a possibilidade de fabricar furos, com alta qualidade superficial e geométrica.

Além disso, a necessidade de gerar superfícies com uma topografia especial, principalmente quando sua aplicação está vinculada à solicitações por atrito, tem no brunimento uma das soluções mais adequadas. Quer seja por meio das linhas de corte entrecruzadas, ou mesmo através da geração de superfícies platafórmicas, o brunimento permite a retenção de uma camada superficial de lubrificante. Fator que melhora o comportamento de desgaste, propicia um bom contato entre as partes móveis e reduz sensivelmente os níveis de ruído produzidos durante o trabalho.

Todas estas características, aliadas às crescentes inovações tecnológicas que se agregam ao brunimento desde o seu desenvolvimento, têm fortalecido e ampliando as aplicações do processo nos mais diversos campos da indústria, principalmente na fabricação de componentes hidráulicos, elementos de motores e compressores, peças rotativas e etc. Dentro deste contexto situam-se as ferramentas "Precidor", que a partir de seu surgimento, na década de setenta, vêm abrangendo uma boa parte deste ramo da fabricação.

De forma semelhante ao que acontece com os demais processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida, em relação ao brunimento existem poucas informações que compilem o conhecimento adquirido e acumulado na área. Em se tratando de um processo específico, como é o caso do brunimento "Precidor", as informações são bem mais restritas, apesar da aplicação prática do processo encontrar-se bastante difundida.

A necessidade de conhecer mais a respeito deste processo de usinagem, visando um maior domínio de suas características tecnológicas, levou a Empresa Brasileira de Compressores - **EMBRACO** a firmar um convênio de cooperação com o Laboratório de Mecânica de Precisão - **LMP**, o qual resultou, entre outras publicações, na execução deste trabalho. Para isto, foi executado um estudo orientado ao brunimento, de dois, dos compressores produzidos pela empresa, o que possibilitou a análise do comportamento do processo como um todo, e a investigação de suas variáveis de entrada .

No brunimento, uma das grandezas que influi significativamente sobre os resultados do trabalho é a pressão de contato, gerada entre a superfície brunida e pebra de brunir. A avaliação do comportamento do processo poderia, então, ser executada em função desta variável de entrada, contudo a obtenção da pressão de contato é muito difícil, principalmente com o emprego de ferramentas que possuam sistema de expansão mecânica. Esta limitação fez com que se procedesse de uma forma alternativa para caracterizar o processo. Optou-se por monitorar o comportamento da força de avanço e do momento torçor, em função da remoção de material e da forma inicial das peças brunidas, o que levou à identificação das etapas do processo, permitindo a análise sobre os fenômenos que regem este tipo de usinagem .

Na etapa de investigação da influência das variáveis de entrada sobre os resultados obtidos com o brunimento, as restrições encontradas relacionaram-se às condições de realização dos ensaios, pois uma série de medições deveria ser efetuada, nas peças, antes e depois dos experimentos. Para viabilizar este estudo buscou-se uma metodologia que permitisse avaliar qualitativamente a influência de diversos fatores sobre um resultado, empregando no entanto um pequeno número de experimentos. Chegou-se ao uso das técnicas Taguchi, que além de uma análise bem mais rápida, permitem uma boa confiabilidade nos resultados, tanto que tendências de comportamento esperadas foram registradas no desenrolar dos ensaios.

Este estudo direcionou-se à avaliação de um processo específico, dentro do brunimento de curso longo, mas apesar deste ser o aspecto principal enfocado, uma visão global do brunimento é desenvolvida ao longo do trabalho.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

**PESQUISA BIBLIOGRÁFICA :** Pretende-se desenvolver um levantamento bibliográfico que reúna um grande número de informações sobre o processo de brunimento, em especial , sobre o brunimento de curso longo. Com esta pesquisa objetiva-se investigar as grandezas de principal influência sobre o processo, o que propicia o embasamento para a verificação experimental.

**ANÁLISE DAS FORÇAS DE BRUNIMENTO :** pretende-se conhecer o comportamento da força de avanço  $F_f$  e do momento torçor  $M_t$ , bem como a ordem de grandeza em que estes esforços se encontram durante o processo. Com isto objetiva-se caracterizar as diversas etapas do processo. Esta análise será procedida em relação à sobremedida de material a usinar e ao desvio de forma inicial das peças brunidas.

**ANÁLISE DAS GRANDEZAS DE ENTRADA :** Pretende-se analisar a influência de fatores como a sobremedida de material, desvio de forma e rugosidade iniciais da peça, curso, rotação e avanço da ferramenta sobre os resultados obtidos no brunimento "Precidor". Procura-se identificar as variáveis de maior significância de maneira que se possa mostrar como proceder para a otimização do processo.

# **CAPÍTULO 3**

## **ESTADO DA ARTE DO BRUNIMENTO**

### **3.1. HISTÓRICO DO BRUNIMENTO**

Uma das primeiras notícias sobre o emprego do processo de brunimento, foi registrada em 1910, na Alemanha. Nesta ocasião a ferramenta de brunir era constituída de um cilindro de madeira bipartido, no qual encontravam-se dispostas as pedras abrasivas. A operação consistia em fazer com que as metades da ferramenta fossem pressionadas contra as paredes do furo, procedendo a remoção de material. Neste primeiro desenvolvimento tanto o avanço quanto a rotação do sistema eram manuais. Pouco mais tarde foi empregado um pistão de alumínio adaptado a uma furadeira de coluna, que conduzia tal ferramenta. Após a I Guerra Mundial, especialistas norte-americanos adotaram o novo processo e o desenvolveram para a fabricação em série. No ano de 1921, uma fábrica em Detroit registrou a primeira patente do processo de brunimento, que se distinguia pelo uso de uma ferramenta expansível e um elemento cardânico de transmissão de força. Em 1926, este processo de fabricação havia sido introduzido em várias indústrias automobilísticas, especialmente na usinagem dos cilindros de blocos de motores.

Uma outra origem do processo resultou no desenvolvimento do brunimento de curso curto. Em 1935, a Chrysler detectou falhas, em seus mancais, causadas por impacto e vibrações resultantes do acabamento insuficiente nas pistas de rolamentos. Estas falhas foram eliminadas pela melhora da qualidade superficial fornecida por um novo processo criado na própria empresa, o "superfinishing". Mais tarde um número maior de empresas nos EUA, Alemanha e URSS, continuou as pesquisas e desenvolvimentos na produção de máquinas de "superfinishing" [1].

A década de 60 ficou marcada principalmente pelo início do emprego de ferramentas de diamante em alta escala. A longa vida das ferramentas associada às altas taxas de remoção

proporcionou o crescimento da produtividade, permanecendo a qualidade das peças constante ao longo do processo. Apesar das limitações quanto aos diâmetros que inicialmente podiam ser brunidos, de 150 a 180 mm, qualidade dos ligantes e a competição oferecida pelo corindum, estas ferramentas efetivaram-se de forma significativa. Neste período iniciou-se também o uso do brunimento em duas etapas, desbaste e acabamento [2].

Nos anos 70, questionou-se sobre a possibilidade do emprego do processo de brunimento para trabalhos finos. O crescente aumento das exigências de precisão e as constantes melhorias dos sistemas de medição levaram à esta situação. Como resultado surgiram novas tecnologias no campo dos abrasivos e mesmo na concepção das ferramentas, onde se pode destacar as ferramentas "Precidor" [3]. Ainda na metade desta década, a empresa General Electric desenvolveu uma nova classe de CBN, o Borazon S10, com a finalidade de aplicá-lo exclusivamente em ferramentas de brunir. Este abrasivo recebia um tratamento superficial específico, ocasionando uma alta aderência com a matriz metálica. Além disto, a possibilidade de velocidades de corte mais elevadas, maiores taxas de remoção e grande uniformidade dos grãos, tornaram este abrasivo um forte concorrente ao óxido de alumínio, apesar de seu custo mais elevado [4].

Atualmente pode-se observar um crescente desenvolvimento na área. Um maior domínio na produção de abrasivos, principalmente diamante e CBN, tem propiciado o controle dimensional e geométrico dos grãos. As novas características construtivas das ferramentas têm permitido a obtenção de peças com alta precisão, o que reflete sensivelmente na produção [5].

Em conjunto, a automatização das máquinas de brunir tem levado a uma alta eficiência destes sistemas produtivos, possibilitando a correção de erros de forma, redução de custos, alta eficiência, mas principalmente grande flexibilidade de produção [6].



### **3.2. USINAGEM COM GUMES DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA**

Para que se possa discernir sobre um processo de usinagem, deve-se ter em consideração a tecnologia básica que o envolve. Entenda-se por tecnologia básica os fenômenos referentes à geometria da ferramenta, formação de cavacos, forças na zona de corte e no gume da ferramenta, além do entendimento do fenômeno de desgaste.

Deve-se ter em mente que os aspectos acima são interdependentes, isto é, não se pode falar em desgaste sem conhecimento preciso da geometria da ferramenta, material usinado e dos esforços envolvidos. Estes itens são, de certa forma, facilmente obtidos na usinagem com geometria definida, ao passo que nos processos de fabricação com geometria não definida existem complicações tecnológicas.

#### **3.2.1. Forma Média dos Gumes de Geometria não Definida**

Grande parte dos grãos abrasivos utilizados neste processo são feitos de materiais cristalinos duros, cujos formatos e granulometria são obtidos através de moagem. Por isso e graças à natureza frágil destes materiais, tem-se a forma geométrica aleatória, que apresenta gumes afiados e cantos vivos [7]. Quando se trata de CBN e diamante, ambos obtidos por processos de sintetização, deve-se considerar que apesar de uma maior homogeneidade, também a aleatoriedade está presente.

Outro ponto a ser considerado é o fato de que apenas as partes mais salientes da superfície dos grãos penetram na peça, de forma que estas protuberâncias são os gumes propriamente ditos. Devido ao grande número de gumes atuantes, bem como pelo fato da estrutura geométrica desses grãos variar com o desgaste, é impossível determinar uma forma geométrica definida para todos eles [7;8;9]. Em geral os gumes apresentam dois perfis principais, como se pode observar na figura 3.1.

A forma (a) mostra o tipo mais raro de perfil encontrado. Este apresenta melhores características de corte, pois sua geometria é mais apropriada à usinagem, o que é evidenciado pelo ângulo de incidência ( $\alpha$ ) bem definido. Ao passo que na forma (b), correspondente à mais usual, nota-se uma superfície resultante de desgaste ou dressamento, o que implica em um ângulo ( $\alpha$ ) tendendo a zero. Esta condição propicia um aumento muito grande no atrito gume-peça, com conseqüente aumento do calor e da força gerados no processo [7;8].

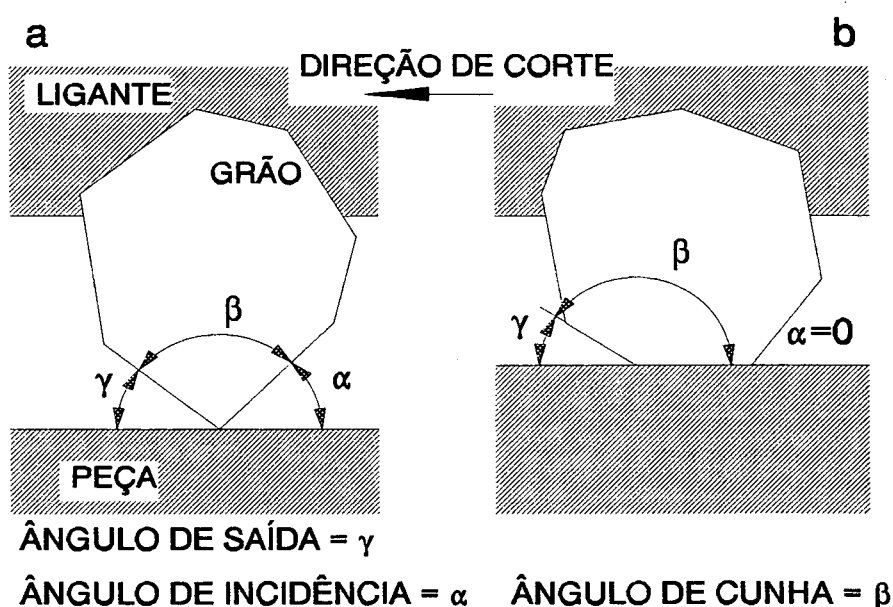


Figura 3.1 - Forma média dos grãos [8]

### 3.2.2. Princípio de Atuação dos Processos de Geometria não Definida

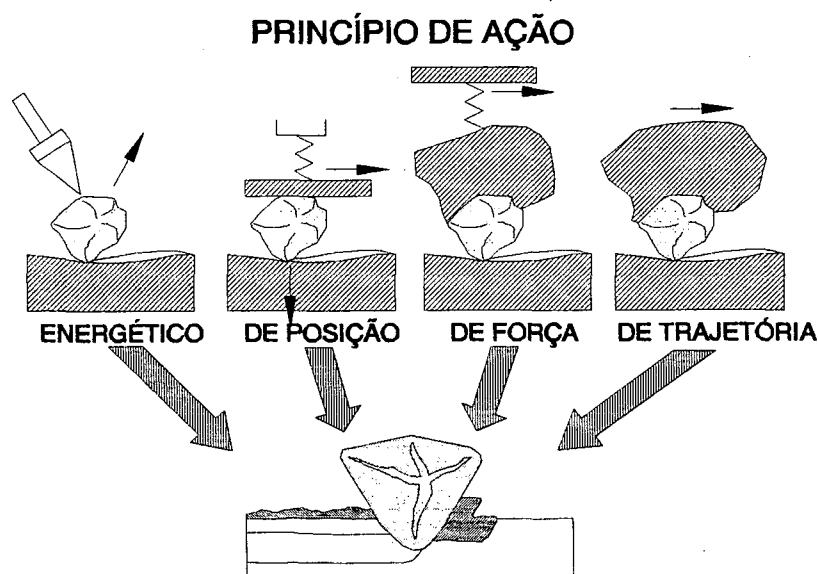
Além da geometria dos gumes, a maneira como estes são levados a penetrar na peça é de suma importância [7]. Na figura 3.2 distinguem-se quatro formas para se obter a penetração do grão abrasivo na superfície usinada. Cada processo pode ser diferenciado então, de acordo com o princípio de penetração dos gumes.

No jateamento, os grãos abrasivos não ligados são arremessados sobre a superfície a ser trabalhada. No caso de materiais dúteis formam-se pequenas crateras, devido a um processo de

encruamento superficial. Se o material a ser trabalhado é frágil, então a ação do grão se dá no sentido de arrancar partículas. A remoção ocorre principalmente devido a energia cinética de que é provido o grão abrasivo.

No processo de lapidação a remoção de material pode ocorrer de três formas. Na primeira, o grão abrasivo, limitado entre a peça e a ferramenta de lapidar, provoca o aparecimento de pequenas crateras na superfície usinada. A segunda forma de remoção acontece por um processo de fadiga devido ao rolamento constante do grão, o que caracteriza também o princípio de ação por limitação do espaço físico ou posição. O terceiro meio de ação apresenta-se quando a superfície da peça exerce uma elevada pressão contra o disco. Como o grão abrasivo está sem a possibilidade de rotação, ocorre a formação de riscos na superfície da peça. Neste caso o princípio de ação utilizado é o de força.

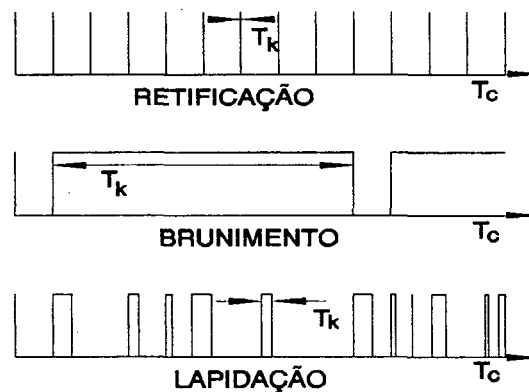
Nos processos de retificação e brunimento a remoção também ocorre por força, mas como os grãos estão fortemente ligados, descrevem um movimento em relação à peça. Portanto, tem-se o princípio de penetração por trajetória.



**Figura 3.2 - Formas penetração do gume [7]**

### 3.2.3. Tempo Específico de Contato do Grão

O tempo de contato específico do grão é definido como a razão entre o tempo de contato ( $T_k$ ) e o tempo de processo ( $T_c$ ). Para se ter uma idéia da ordem de grandeza do tempo de contato de um grão, como função do processo de usinagem, pode-se analisar a figura 3.3.



**Figura 3.3** - Tempo de contato como função do processo [10]

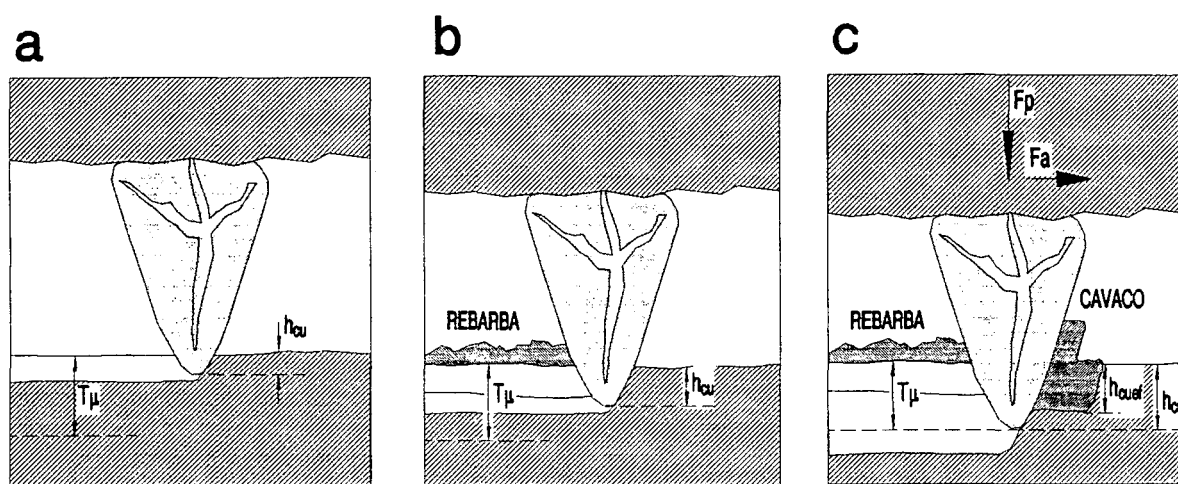
Nota-se que no brunimento o tempo de contato é maior, pois os grãos só deixam de tocar a peça nos finais de curso. Na retificação, os toques dos grãos na superfície da peça ocorrem no período que corresponde a uma revolução do rebolo e no processo de lapidação, o contato grão-peça é aleatório.

### 3.2.4. Penetração do Gume e Formação de Cavaco no Brunimento

Durante o brunimento os grãos abrasivos penetram a superfície da peça em uma trajetória plana. Como estes grãos não estão uniformemente distribuídos no ligante, existindo gumes mais protuberantes que outros, nem todos executam o corte simultaneamente. Para que ocorra efetivamente a remoção de material, se faz necessário que a espessura de usinagem ( $h_{cu}$ ), já durante a entrada do gume na peça, atinja a profundidade de início de corte ( $T_\mu$ ), como se observa na figura 3.4.c.

Com gumes menos salientes (a e b) não é possível chegar a este valor, assim somente as deformações elástica e/ou plástica são conferidas à superfície, sem que haja formação de cavaco propriamente dita.

Pesquisas mostraram que a profundidade ( $T_u$ ) e a espessura efetiva ( $h_{cu\ ef}$ ) dependem da geometria do gume, da velocidade com que o gume se desloca, das relações de atrito do sistema e das condições de escoamento do material [7].



**Figura 3.4** - Representação esquemática da remoção no brunimento

No brunimento, os cavacos produzidos pelo grão abrasivo são muito pequenos, apresentando formas geométricas variadas dado a irregularidade dos gumes e sua distribuição descontínua no meio ligante [9]. A direção tomada pelos cavacos é função da cinemática do processo, enquanto que o sentido de saída dos mesmos é inverso ao movimento de avanço da ferramenta. À medida que a usinagem se processa, os cavacos deslizam sobre a superfície da peça, atingem o ligante provocando seu desgaste e por fim mudam de direção, possibilitando a mudança de sua forma [1;8]. Observando-se estes cavacos, vemos que têm grande similaridade com as partículas de material removidas no processo de torneamento, fresamento ou plainamento. Isso demonstra que o corte com os grãos abrasivos é sujeito às mesmas leis que regem as ferramentas de geometria

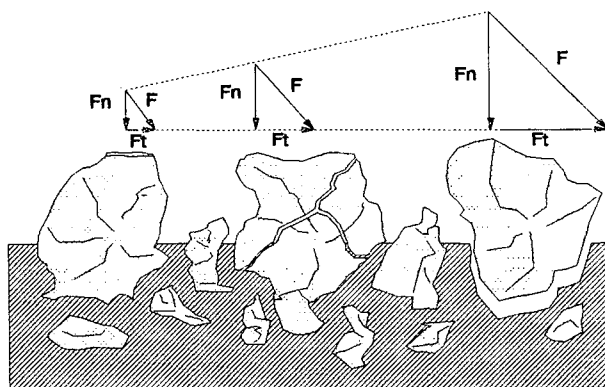
definida [8;9]. De acordo com as condições impostas pelo processo, como velocidade, pressão de trabalho, lubrificação e a própria abrasividade da ferramenta, podem ocorrer cavacos irregulares, em vírgula e espiral, figura 3.5.



**Figura 3.5** - Formas dos cavacos resultantes no brunimento [8]

### 3.2.5. Desgaste do Abrasivo e do Ligante

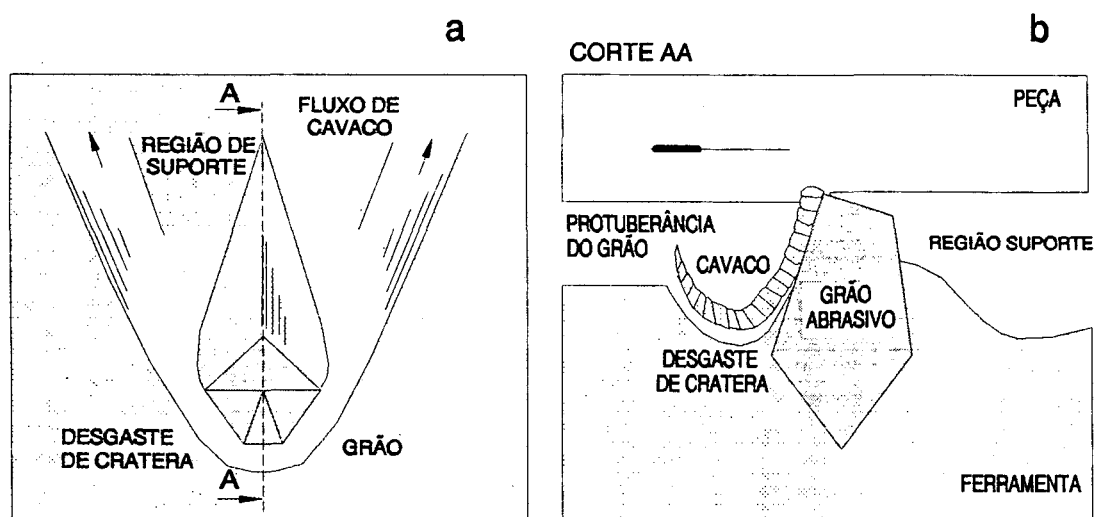
Os mecanismos que regem o desgaste das ferramentas de abrasivos super duros e convencionais são distintos. Materiais convencionais, como o óxido de alumínio e o carboneto de silício por exemplo, apresentam cegamento de gumes isolados, resultante das altas pressões e desgaste por abrasão [7]. Quando os níveis de desgaste atingem patamares nos quais o valor da força de corte supera o da força de fixação do grão, este se desprende por inteiro, podendo haver o deslocamento de vários grãos em cadeia, figura 3.6 [10]. Em proporção similar, o ligante, muitas vezes vitrificado, desgasta pelo rompimento da estrutura, ou ainda pelo entupimento dos poros com os cavacos [11].



**Figura 3.6** - Desgaste dos grãos abrasivos convencionais [10]

Os grãos abrasivos de diamante e CBN, devido sua alta dureza, não desgastam abrasivamente. Assim, o mecanismo de arrancamento dos grãos e deterioração da ferramenta é diferente, apesar de, em altas pressões, os abrasivos super duros estilhaçarem da mesma forma que os convencionais.

Durante a usinagem com estas ferramentas, os cristais giram com uma determinada velocidade de corte, removendo material da peça. Os cavacos, continuamente formados, provocam o aparecimento do desgaste de cratera no ligante, exatamente na frente de cada grão cortante, figura 3.7b. Como a movimentação das pedras apresenta dois sentidos no decorrer do processo, os cavacos são removidos da região de corte, promovendo o aparecimento de vales em forma de "V", figura 3.7a.



**Figura 3.7 - Desgaste da ferramentas de diamante e CBN [4]**

O material removido da região anterior ao grão o torna mais protuberante, em virtude disto o mecanismo de corte é favorecido. Na parte de trás, no entanto, não há o desgaste do ligante o que resulta em uma região de suporte, a qual acaba por sustentar o grão abrasivo, prevenindo o seu descolamento prematuro [4].

### 3.3. CARACTERIZAÇÃO DA PEDRA DE BRUNIMENTO

#### 3.3.1. Materiais Abrasivos

No brunimento a remoção de material se processa através da ação de grãos abrasivos, unidos entre si por um ligante. Para que exista remoção eficiente de material é necessário que os grãos possuam certas características, como:

- ruptura frágil, propiciando um contínuo aparecimento de gumes vivos;
- alta dureza, para que mantenham por muito tempo os gumes afiados e
- resistência termo-química, evitando a deterioração ou reação com o material da peça.

Como é difícil que um abrasivo satisfaça a todas estas exigências simultaneamente, sua escolha depende do material a ser brunido e do resultado desejado [7;12]. A seguir são apresentados os principais materiais utilizados atualmente na confecção de pedras de brunir, bem como algumas de suas características e propriedades.

#### - Carboneto de silício (SiC)

O carboneto de silício é um abrasivo sintético obtido pela fusão de uma mistura bruta de 53% de quartzo branco puro e 40% de coque de alta qualidade, aos quais são acrescentados cerca de 5% de serragem e 2% de cloreto de sódio. A dureza do carboneto de silício é relativamente alta ( $K_{100} = 2450$  a 3000) e independe da orientação dos cristais, sendo esta variação resultante apenas do processo de obtenção do material. O SiC possui boas características de fratura e uma alta estabilidade química e térmica, apresentando-se sua temperatura de amolecimento próxima à 2000°C e a de recristalização perto de 2400°C.

Distinguem-se basicamente duas qualidades de carboneto de silício, as quais variam com



o tipo e porcentagem de impurezas, e com a posição dentro do forno durante a fusão:

- **Verde** - a cor esverdeada está associada à presença de pequenas porcentagens de nitrogênio no carboneto de silício muito puro;

- **Preto** - a presença de alumínio ou seus óxidos conferem coloração de azul a preto ao carboneto de silício menos puro.

A dureza associada às duas qualidades é praticamente igual, porém o carboneto preto apresenta uma maior tenacidade [13]. O carboneto de silício é indicado para obrunimento de ferros fundidos, onde há a necessidade do grão penetrar o material e levantar os cavacos. No SIC esta propriedade é assegurada por sua dureza, que garante a penetração, juntamente com a característica de estilhaçamento, responsável pela constante afiação [14].

#### - Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ )

O coríndun natural compõe-se principalmente de óxido alumínio, com um teor de 80 a 90%, o que lhe assegura uma dureza relativamente elevada ( $K_{100}=2050$ ). Atualmente não é aplicado, devido as melhores propriedades do coríndun artificial [9;13].

O coríndun artificial ou sintético é um óxido de alumínio com pequenas porcentagens de impurezas, geralmente  $TiO_2$ ,  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$ . O grau de tais impurezas distingue as três qualidades básicas encontradas no mercado:

- **Normal** - muito usada, apresenta a cor marrom, cuja intensidade é função do teor de  $TiO_3$ . Uma variação desta coloração é produzida em função da queima da pedra, que muda para azul de diferentes tonalidades, característica também influenciada pela presença de  $Fe_2O_3$  [9]. São de uso geral para aços comuns [13].

- **Média** - apresenta cor marron mais clara até cinza esbranquiçado, usado para retificação de aços em geral.

- **Extra** - tem cor branca e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com pureza superior a 99%, apresentando grãos duros ( $K_{100}=2150$ ), porém menos tenazes e mais friáveis. A adição de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  em porcentagens baixas altera dureza e a friabilidade do abrasivo, modificando sua cor para rosa. É usada em aços rápidos, temperados ou cementados [9;13].

### - Nitreto de boro cúbico (CBN)

O CBN é o abrasivo mais duro conhecido, excetuando-se o diamante. Porém resiste melhor à temperatura do que o diamante. Os grãos de CBN apresentam dureza ( $K_{100}=4700$ ) e um aspecto moderadamente moletado, em duas qualidades básicas:

- **Com recobrimento** - possui 60% de níquel em peso e é recomendada especialmente para ferramentas com ligantes resinóides, sendo aplicados em trabalhos a seco e úmido.

- **Sem recobrimento** - indicada para ligas vitrificadas e metálicas [9].

O abrasivo de CBN é estável, sob pressão atmosférica, até 2000°C. Se ultrapassada esta temperatura ocorre a regressão da forma cúbica à forma hexagonal e a perda das suas propriedades mecânicas [9;13]. Reage com água ou vapor d'água a temperaturas perto de 800°C, logo é aconselhável reduzir a porcentagem de água no refrigerante ou escolher um fluido adequado, para obter uma maior vida útil [9]. Uma grande vantagem deste material é a capacidade de ruptura frágil que induz à afiação contínua dos grãos [15]. Apesar de seu preço elevado, o CBN é usado para brunir todos os tipos de aços, níquel, superligas de cobalto e outros metais, incluindo berílio e zircônio [12].

## - Diamantes

O diamante vem sendo largamente empregado para a confecção de ferramentas de brunimento devido ao seu alto desempenho tecnológico. Entre as propriedades mais relevantes do diamante, como material abrasivo, deve ser citada a sua extrema dureza ( $K_{100}=5000$  a  $8000$ ), a qual nenhum outro material pode atualmente alcançar. Os diamantes se dividem em dois grupos fundamentais:

- **Diamante natural** - é composto quimicamente por carbono puro, o qual foi formado em condições de pressão extremas e temperaturas elevadas, durante um longo período de tempo. Aproximadamente 80% dos diamantes naturais não podem ser empregados como diamantes de joalheria, em decorrência de falhas e inexistência de pureza suficiente. Esses diamantes estão à disposição da indústria e suas propriedades são muito boas.

A aplicação do diamante natural se dá em materiais moles, graças à alta resistência dos grãos, onde é possível uma forte pressão de expansão da ferramenta e com isso um bom rendimento de corte. Devido ao reduzido desgaste, o diamante natural apresenta vida longa [16].

- **Diamante sintético** - para a sua fabricação é exigido um alto desempenho energético e técnico. Existem três processos básicos para sua obtenção, porém 90% de todos os diamantes são fabricados pela transformação direta de grafite em diamante, através da ação de um catalizador (níquel). Este processo de sintetização possui uma grande flexibilidade, pois a escolha adequada das suas condições torna possível controlar a velocidade de crescimento dos cristais, dentro de uma faixa determinada [7].

Os diamantes tem uma condutibilidade térmica bem maior que a dos materiais citados anteriormente, aspecto importante já que o diamante em meio ambiente grafitiza quando

ultrapassa a 900°C. No entanto, esta temperatura não é atingida no brunimento. A principal aplicação do diamante sintético é o brunimento de materiais que formam cavacos curtos: ferro fundido, aços temperados, cromo duro, aços enobrecidos, chapas de cobre, metal duro, cerâmica, vidro, latão, bronze, alumínio, materiais sinterizados e superfícies nitretadas com profundidades maiores que 0,03 mm [2;4;5;13].

### **3.3.2. Ligantes**

Em todas as ferramentas abrasivas classificadas de acordo com a norma DIN 69.111, com exceção dos abrasivos soltos, os grãos são unidos entre si por ligantes bastante diversificados. Os ligantes têm a função de manter o grão aprisionado, até que este esteja suficientemente cego ou tenha perdido sua capacidade de corte, em decorrência do processo de usinagem. Neste momento, o ligante deve liberar o grão desgastado para que os grãos mais afiados entrem em ação [7]. Vários ligantes são empregados na fabricação de ferramentas de geometria não definida, porém serão apresentados somente os materiais mais utilizados no processo de brunimento.

#### **- Ligantes orgânicos**

- **Resinas sintéticas** - estes ligantes constituem-se de uma ou da combinação de algumas resinas, com ou sem materiais de enchimento. As mais usadas são as fenólicas ou fenoplásticas que caracterizam-se por serem resinas endurecíveis ou termofixas [13]. Nos últimos anos, com o aumento dos níveis de qualidade, as especificações em relação à viscosidade, fluidez, bem como dos materiais de enchimento e granulometria do pó, tornaram-se rigorosas. A granulometria da resina é de grande importância na qualidade das ferramentas e deve ser mantida dentro de tolerâncias bastante estreitas. Já os materiais de enchimento, como o óxido de ferro, o quartzo e o hidróxido de cálcio, evitam a formação de cavidades, fornecendo às pedras uma

maior resistência à flexão e à temperatura [7].

### - Ligantes inorgânicos

• **Ligantes metálicos** - tratam-se de ligantes de concepção mais recente, utilizados para a confecção de pedras com abrasivos de diamante sintético e de nitreto de boro cúbico. Estes ligantes podem ser desenvolvidos pelos seguintes processos:

- sinterização de pó de bronze ou metais nobres;
- deposição galvânica de metal sobre um suporte coberto de abrasivo e
- infiltração da estrutura porosa do abrasivo por um metal de baixo ponto de fusão.

Exemplos de revestimentos de diamante encontrados no mercado são as ligas de bronze, mistas e de aço, fabricadas nas especificações densa ou porosa, mostradas na tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Tipos de ligantes metálicos**

DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Liga de bronze (Bz) B410	Poroso, muito desgastável	Material duro
(Bz) B510	Sujeito a desgaste	Material duro
Liga mista (Bz St) B570	Poroso médio	Material duro / tenaz
(Bz St) B770	Poroso médio	Material duro / tenaz
Liga de aço (St) B610	Muito resistente a desgaste	Material mole
(St) B810	Poroso, resistente ao desgaste	Material mole

### **- Ligantes cerâmicos ou vitrificados**

A maioria das ferramentas são produzidas com ligantes que se assemelham bastante com a porcelana e o vidro. Os ligantes cerâmicos ou vitrificados são misturas de materiais plastificantes como caulim, argilas brancas e vermelhas, quartzo e feldspato [7]. Atualmente são adicionados fundentes, constituídos geralmente de silicatos de boro ou vítreos, com certo teor de monóxido de magnésio, os quais baixam a temperatura de queima do ligante.

Os ligantes cerâmicos conferem às pedras as seguintes propriedades:

- muita agressividade, em virtude da estrutura bastante porosa;
- inelasticidade, pela dureza vítrea do ligante;
- insensibilidade ao calor e ao frio, porém sensibilidade a choques térmicos e
- alta estabilidade frente a ácidos, água, fluido de corte, óleo, gases, etc. [13].

### **3.3.3. Especificação da Pedra de Brunir**

#### **- Granulometria do abrasivo**

A dimensão e uniformidade dos grãos são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. A classificação mais usual especifica o tamanho dos grãos em "mesh", que representa o número de fios por polegada linear da peneira do processo de seleção, o que é usual para os abrasivos convencionais. Para grãos de diamante ou CBN é usada também a classificação da FEPA (Federação Européia dos Fabricantes de Abrasivos) que especifica a abertura da malha da peneira em  $\mu\text{m}$  [13]. As dimensões dos grãos de diamante são indicadas internacionalmente pelo sinal "D". O número subsequente indica o diâmetro médio da granulação em microns [16]. As especificações dos grãos através das normas FEPA e DIN, são mostradas na tabela 3.2.

**Tabela 3.2-** Comparação entre as normas FEPA e DIN

FEPA	DIN	GRANULOMETRIA	
		em $\mu\text{m}$	em MESH
D 7	D7	5...10	.....
D 15	D 15	10...20	.....
D 20	D 20	15...25	.....
D 30	D 30	20...40	.....
D 46	D 40	38...45	325...400
D 54	D 50	45...53	270...325
D 64	D 60	53...63	230...270
D 76	D 70	63...75	200...230
D 91	D 80	75...90	170...200
D 107	D 100	90...106	140...170
D 126	D 120	106...125	120...140
D 151	.....	125...150	100...120
D 181	D 150	150...180	80...100
D 213	D 200	180...212	70...80
D 251	D 250	213...250	60...70

### - Dureza da pedra de brunir

A dureza da pedra de brunir ou de outros corpos de retificação é a resistência que a liga oferece ao desprendimento dos grãos. O grau de dureza da pedra depende da resistência da camada de ligante entre os grãos e da magnitude tanto das porosidades quanto dos grãos [19]. A dureza ideal é aquela na qual os grãos gastos e arredondados são eliminados do ligante, de modo que haja uma reafiação automática da pedra. A especificação da dureza é feita por letras maiúsculas, como mostrado na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 -** Especificação para a pedra de brunir [13]

Extra-macio	A - B - C - D - E - G
Macio	H - I - J - K
Médio	L - M - N - O
Duro	P - Q - R - S
Extra-duro	T - U - W - Z

Materiais que se deixam usinar com facilidade, como os ferros fundidos, produzem na usinagem muitos cavacos, o que tem um forte efeito de desgaste e descarbonização sobre o ligante. Por isso, nestes casos, o ligante deve ser muito resistente ao desgaste. No caso de materiais duros, como em aços temperados, acontece o contrário, ou seja, os gumes do abrasivo só podem penetrar no material em pequena profundidade e sob alta pressão, produzindo poucos e finos cavacos, os quais têm pouco efeito desgastante. Neste caso o ligante deve ser bastante suscetível ao desgaste a fim de permitir uma certa liberdade aos grãos. O princípio tecnológico material duro / liga mole e vice-versa tem, também aqui, a sua validade [20].

#### **- Estrutura da pedra de brunir**

Refere-se ao espaçamento entre grãos e não tem relação direta com a densidade ou com a porosidade [13]. A identificação das pedras de brunir é semelhante aos rebolos, pois a estrutura também é diferenciada por números de 1 a 9. Assim, 1 significa uma estrutura fechada e 9 uma estrutura aberta. A estrutura fechada determina um aumento no número de gumes cortantes por unidade de área na pedra de brunir e a estrutura aberta oferece mais espaços para o alojamento do cavaco. Para a seleção da estrutura, deve-se levar em conta o material a usinar, o acabamento desejado e tipo de trabalho [13;19].

#### **- Concentração**

Este item relaciona-se apenas a ferramentas diamantadas. Com a indicação da concentração sabe-se a quantidade de grãos de diamante, em quilates (0,2 gramas), contida em um centímetro cúbico de revestimento de corte.



**Tabela 3.4 - Equivalência entre concentração e quilates de diamante**

CONCENTRAÇÃO	QI / cm <sup>3</sup>
200	8.8
150	6.6
125	5.5
100	4.4
75	3.3
50	3.2
25	1.1

### - Designação da pedra de brunir

As características para a especificação das pedras de brunimento são apresentadas pela norma DIN 69.186, onde são relacionadas informações sobre geometria, dimensões, bem como a composição das pedras, figura 3.8 [7].

PEDRA DE BRUNIMENTO DIN - 69.186 A 10 x 160 A 150 L 8 V

A - QUADRADO

SEÇÃO

B - RETÂNGULO

LARGURA

SINAL DE SEPARAÇÃO

COMPRIMENTO

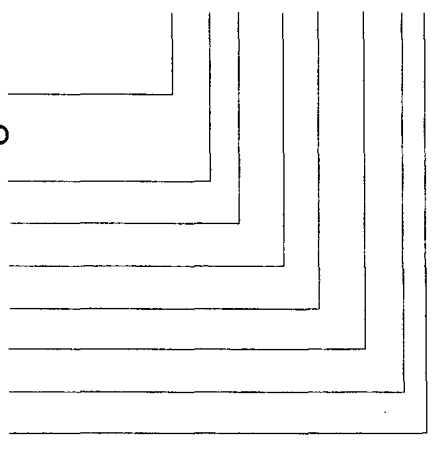
ABRASIVO

GRANULOMETRIA

DUREZA

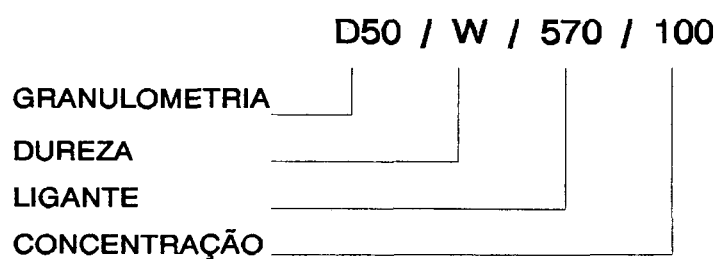
ESTRUTURA

LIGANTE



**Figura 3.8 - Esquema para designação de uma pedra de brunir DIN - 69.186 [7;21]**

A Classificação de rebolos com abrasivos superduros (Diamante e CBN) é um tanto diferenciada, como se pode observar na figura 3.9:

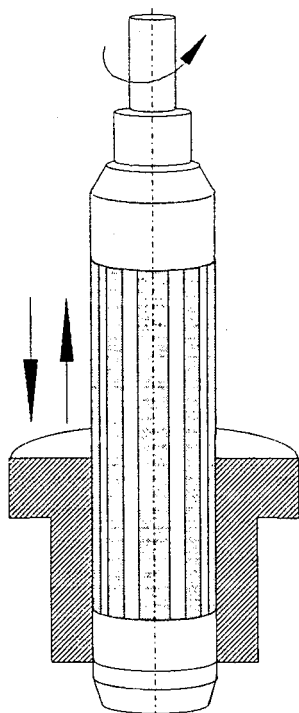


**Figura 3.9** – Designação de uma pedra diamantada

### 3.4. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO

O brunimento é um processo usado para melhorar as características superficiais e conferir precisão geométrica e dimensional às peças obtidas por operações anteriores como usinagem, sinterização, tratamento térmico, etc. Este processo elimina danos superficiais pelo emprego de baixa velocidade e ação suave da ferramenta, caracterizando-se pela combinação de um movimento axial com um rotacional ou transversal para o brunimento de superfícies planas [7]. Genericamente o processo de brunimento pode ser classificado em dois grandes grupos principais, que diferem entre si pelo curso descrito pela ferramenta:

#### 3.4.1. Brunimento de Curso Longo



**Figura 3.10** - Brunimento de curso longo

O brunimento de curso longo é um processo rápido e preciso, utilizado na usinagem de diâmetros internos, no qual são empregadas ferramentas cilíndricas. As pedras de brunir, montadas sobre o corpo da ferramenta, exercem uma pressão contínua sobre a peça, promovendo a remoção de material.

Em geral, é o processo mais apropriado para a usinagem de furos interrompidos, passantes e curtos em ferro fundido. Além de conferir precisão à forma e dimensão usinada tem, também, o importante propósito de gerar uma topografia própria, requisito fundamental para uma maior retenção de lubrificantes. Por vezes, são empregadas denominações não normalizadas para identificar o processo, tais como, brunimento ou

retificação de tração. Algumas das principais áreas de aplicação do processo, podem ser citadas:

furos em bielas, camisas de cilindro, tambores de freio, furos para fixação de mancais de rolamento ou rolos, cilindros de freio, furos de engrenagens, etc [12].

#### **Vantagens :**

- Curto tempo de fabricação;
- Alta taxa de remoção e
- Correção de erros de forma.

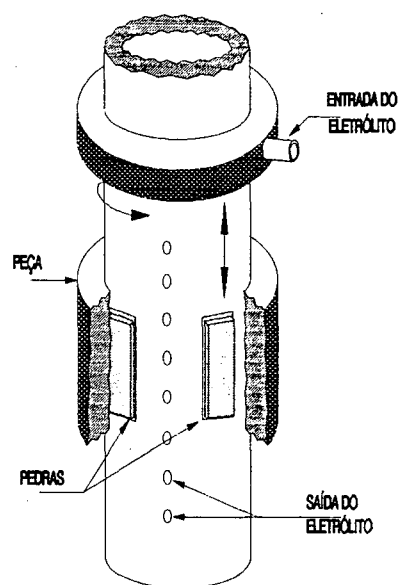
#### **Desvantagens :**

- Aplicação restrita e
- Não é possível corrigir erros de posição [7].

### **- Brunimento eletroquímico**

O brunimento eletroquímico é uma variação do brunimento convencional, onde a remoção de material se dá pela dissolução anódica do metal da peça juntamente com a abrasão mecânica exercida por pedras de brunir [7]. Neste processo a peça é o ânodo e a ferramenta, em aço inoxidável, o cátodo, como se observa na figura 3.11.

A ferramenta precisamente dimensionada para o furo a ser brunido, percorre toda a peça durante o ciclo do brunimento. O eletrólito, na maioria das vezes uma solução de cloreto de sódio, entra no corpo da ferramenta e chega à região de corte, saindo por pequenos furos distribuídos ao longo de seu comprimento. O processo, empregado para a remoção dos picos de rugosidade, apresenta uma mínima formação de cavacos [23].



**Figura 3.11 - Brunimento eletroquímico [22]**

#### **Vantagens :**

- Maior velocidade de remoção e
- Superfícies livres de tensões.

#### **Desvantagens :**

- Necessidade de equipamento mais complexo e
- Controle rigoroso sobre o eletrólito [23].

### 3.4.2. Brunimento de Curso Curto:

O brunimento de curso curto objetiva, também, restaurar a integridade superficial, garantindo precisão geométrica e dimensional às peças usinadas. Com este processo é possível a obtenção de superfícies opticamente lisas, livres de qualquer metal fragmentado e sujeiras das operações anteriores [12]. O processo utiliza pedras abrasivas ligadas, para a usinagem de peças cilíndricas ou ferramentas em forma de copo e disco para a usinagem de peças esféricas e planas [7]. Como no processo anterior, existem denominações não normalizadas como: brunimento fino, "superfinishing" e retificação vibratória. O brunimento de curso curto é subdividido, em diversos tipos descritos a seguir:

#### - Brunimento de curso curto entre pontas

Neste processo a peça cilíndrica a ser usinada é fixada entre pontas, sendo que a operação pode ser realizada em um torno convencional. A pedra de brunir é pressionada contra a peça e desloca-se em seu sentido longitudinal, com movimentos oscilatórios. O brunimento de curso curto entre pontas é utilizado na usinagem de virabrequins, eixos de rotor para motores, rolos de laminação, eixos longos, peças rotativas, etc.

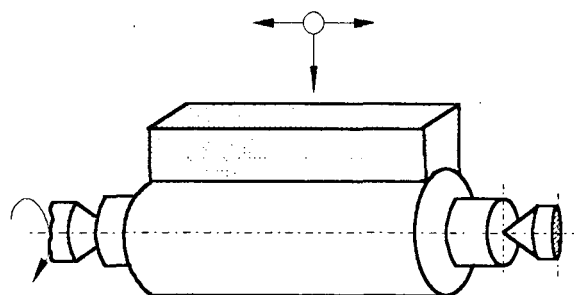


Figura 3.12 - Brunimento entre pontas [12]

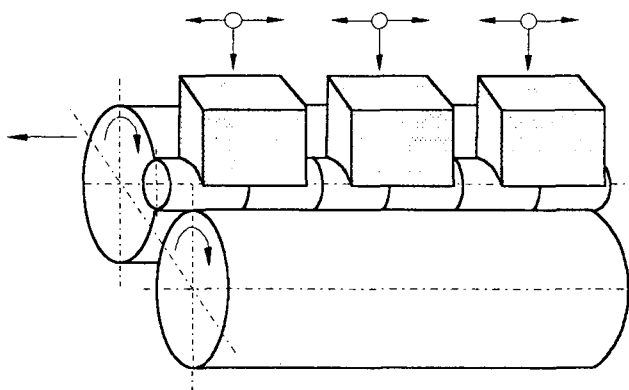
#### Vantagens:

- Brunimento longitudinal;
- Executável em um torno e
- Usinagem de peças grandes.

#### Desvantagens:

- É necessário a centragem;
- Tempos secundários muito grandes e
- Inadequado para produção seriada [7].

### - Brunimento "center-less" de passagem



**Figura 3.13** - Brunimento "center-less" de passagem [8]

O brunimento "center-less" de passagem se caracteriza pelo apoio das peças cilíndricas em dois rolos, sendo que um deste possui o formato de um hiperbolóide de revolução. Tal geometria provoca, durante a rotação do rolo, uma rotação da peça e uma translação graças à componente de arraste axial. Portanto, a peça é conduzida pela fenda de trabalho onde atuam as pedras brunidoras com movimento oscilatório. Pode-se citar várias aplicações

do brunimento center-less de passagem, tais como: eixos, pinos, roletes cônicos e em forma de barril, anéis de rolamentos, balancins, etc [12;24].

#### **Vantagens :**

- Qualidade homogênea;
- Tempos secundários pequenos e
- Possibilidade de automação [7]

#### **Desvantagem :**

- Aplicável apenas em altas produções e
- Tamanho das peças é limitado.

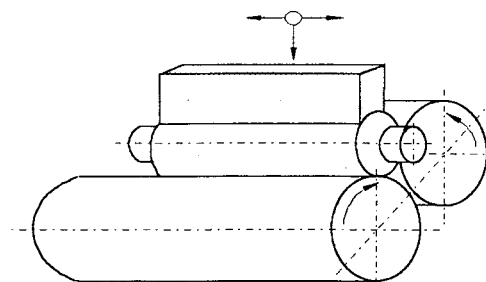
### - Brunimento "center-less" de mergulho

O brunimento "center-less" de mergulho caracteriza-se de forma semelhante ao brunimento "center-less" de passagem, diferenciando-se apenas pela ausência do formato de hiperbolóide no rolo de arraste.

Portanto, neste processo, não há translação da peça, restando-lhe apenas a rotação imposta pelos rolos.

A remoção de material efetua-se pela combinação dos movimentos da peça e da ferramenta. Enquanto a peça gira, as pedras de brunimento, dotadas de movimento oscilatório, são pressionadas contra a superfície a usinar.

Este processo é amplamente empregado na indústria, sendo utilizado principalmente na usinagem de eixos em geral, comando de válvulas, etc [8].



**Figura 3.14 - Brunimento "center-less" de mergulho [8]**

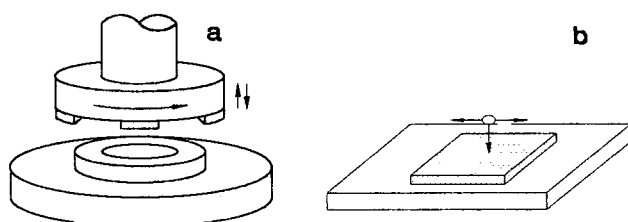
#### **Vantagens:**

- Tempos secundários curtos;
- Centragem não é necessária e
- Possibilidade de automação.

#### **Desvantagens:**

- É necessário aplicar encostos;
- Erros dos cilindros são transmitidos à peça e
- Utilização de uma única pedra de brunir [7].

### **- Brunimento de superfícies planas**



**Figura 3.15 - Brunimento plano [8]**

Neste processo de brunimento, são produzidas superfícies planas lisas e com finos traços entrecruzados. O brunimento plano pode ser realizado manualmente, Figura 3.15b, ou em máquinas, assemelhando-se à lapidação. Como para os demais processos, são necessárias duas componentes de movimento, rotação e

avanço (figura 3.15a), ou mesmo dois movimentos de rotação [7]. Quando utilizam-se máquinas para a mecanização do processo, as peças são colocadas em gaiolas, que as guiam sobre ou entre as faces dos discos de brunir.

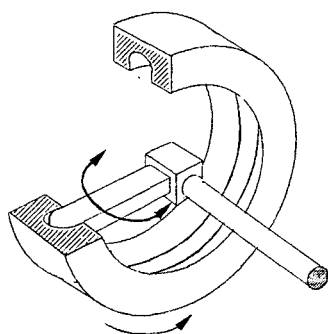
**Vantagens:**

- Grandes taxas de remoção e
- Grande economia de tempo [7].

**Desvantagem:**

- Aplicável somente em casos especiais .

**- Brunimento de perfis especiais**



**Figura 3.16 - Brunimento de perfis [7]**

a rotação é imposta pela peça [1;7].

O brunimento de perfis é usado na usinagem de superfícies externas e internas de peças com geometrias especiais, como é o caso de pistas de rolamento e cones de acabamento. Característica importante deste processo é que a ferramenta possui a forma a ser reproduzida na peça usinada. Como pode-se observar na figura 3.16, a pedra de brunir executa um movimento oscilatório e de avanço, enquanto

**Vantagens:**

- Possível automação e
- Elevada produção.

**Desvantagem:**

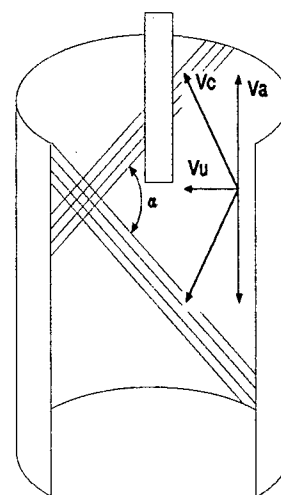
- Erros de perfil não são eliminados [7].



### 3.5. CINEMÁTICA DOS PROCESSOS DE BRUNIMENTO

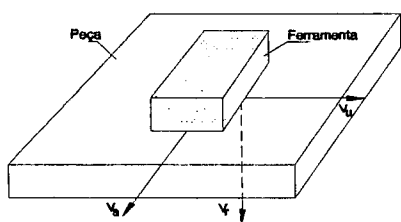
#### 3.5.1. Cinemática do brunimento de curso longo

No brunimento de curso longo, a cinemática resulta da combinação dos movimentos de rotação e de avanço, ambos executados pela ferramenta. Em decorrência, a velocidade de corte resultante ( $V_c$ ) é a soma vetorial de uma componente tangencial ( $v_u$ ) com uma componente de avanço ( $v_a$ ). Esta última é praticamente constante ao longo do curso de brunimento, contudo nas proximidades do ponto morto superior e inferior chega a zero. A cinemática do processo proporciona a formação de finos traços entrecruzados, na superfície brunida, sendo esta uma das principais características do processo de brunimento, figura 3.17. O ângulo de cruzamento ( $\alpha$ ) que se forma entre as linhas de remoção é função da composição da velocidade de corte e, genericamente, situa-se entre  $20^\circ$  e  $60^\circ$  [12].



**Figura 3.17-** Cinemática para o brunimento de curso longo [ 7 ]

#### 3.5.2. Cinemática do Brunimento de Curso Curto



**Figura 3.18 -** Velocidades no brunimento de curso curto

No brunimento de curso curto plano, as relações dos movimentos relativos entre peça e ferramenta são, em princípio as mesmas que no brunimento de curso longo. Estes movimentos podem, geralmente, ser equacionados em função de três componentes de velocidades ortogonais, figura 3.18:

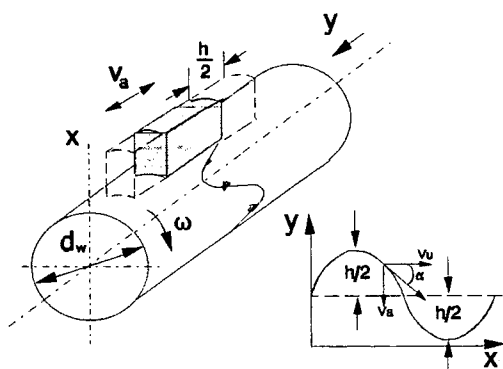
- Duas componentes paralelas à superfície da peça:
  - Velocidades axial ( $v_a$ ) e tangencial ( $v_u$ ).
- Uma componente normal à superfície da peça:
  - Velocidade de posicionamento ( $v_r$ ).

A resultante destas velocidades é dada pela equação:

$$v_{res} = \sqrt{v_a^2 + v_u^2 + v_r^2} \quad (3.4.1)$$

Devido à pequena taxa de remoção,  $v_r$  comparada com  $v_a$  e  $v_u$  é muito pequena. Então, simplificando a equação acima, temos:

$$v_{res} = \sqrt{v_a^2 + v_u^2} \quad (3.4.2)$$



**Figura 3.19** - Cinemática para o brunimento de curso curto

Como o valor e a direção das velocidades estão ligadas ao sistema de acionamento da ferramenta, pode-se dizer que  $v_u$  é constante, e  $v_a$  é resultante do movimento oscilatório da ferramenta, que, em geral, comporta-se como uma onda senoidal. Este comportamento é similar no brunimento cilíndrico externo e, pode ser observado na figura 3.19.

O curso de oscilação  $y$ , para uma dada amplitude de oscilação  $h$ , e uma velocidade angular  $\omega$ , é dado pela equação,

$$y = \frac{h}{2} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad ; \quad (3.4.3)$$

a qual derivada em relação ao tempo gera,

$$v_a = y' = \frac{h}{2} \cdot \cos(\omega t) \quad . \quad (3.4.4)$$

A velocidade angular é dada por,

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad ; \quad (3.4.5)$$

que, multiplicada pela equação (3.4.4) resulta em,

$$v_a = h \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(\omega t) \quad . \quad (3.4.6)$$

Substituindo a equação (3.4.6) em (3.4.2), obtemos:

$$v_{res} = \sqrt{v_u^2 + (h \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \cos^2(\omega t)} \quad ; \quad (3.4.7)$$

cujo valor máximo é

$$v_{res_{máx}} = \sqrt{v_u^2 + (h \cdot \pi \cdot f)^2} \quad ; \quad (3.4.8)$$

e o mínimo:

$$v_{res_{mín}} = v_u \quad ; \quad (3.4.9)$$

com um ângulo de cruzamento ( $\alpha$ ) genérico valendo,

$$\tan(\alpha/2) = \frac{v_a}{v_u} \quad . \quad (3.4.10)$$

### **3.6. ASPECTOS GERAIS SOBRE AS FERRAMENTAS DE BRUNIMENTO**

#### **3.6.1. Forma construtiva das ferramentas de brunir**

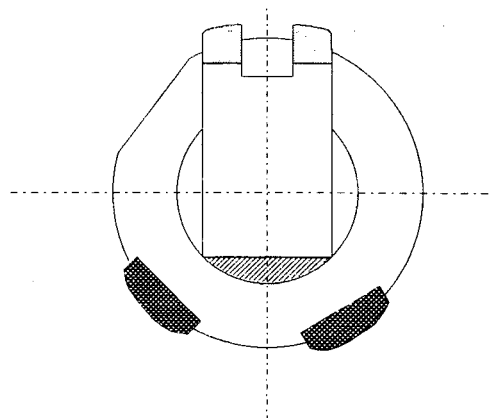
Uma grande variedade de ferramentas tem sido desenvolvida para o processo de brunimento, tanto que atualmente se pode brunir diâmetros a partir de 0,6 mm até 1500 mm [1;16;25]. Para isto, dependendo das características da função e das exigências de qualidade, são utilizadas ferramentas de pedra única, com várias pedras, segmentadas, de casca ou maciças. Em geral, a forma final da ferramenta é definida pelas exigências do processo, sendo sua rigidez, espaço útil do furo e precisão requerida, os principais elementos a serem considerados. No brunimento de múltiplos furos tem-se, frequentemente, diferentes ferramentas de brunir utilizadas simultaneamente. Por exemplo, o primeiro passe de brunimento é feito para o desbaste e, o segundo passe, com uma ferramenta de menor granulometria, para correção da circularidade e melhora da qualidade superficial [18].

Nos últimos anos, o crescente estreitamento das tolerâncias de furos levou a modificações construtivas e, em parte, a novas especificações de materiais das ferramentas de brunimento. Além das ferramentas curtas e rígidas, foram desenvolvidas ferramentas que são guiadas próximo à parte inferior da zona de remoção. Com estas ferramentas, além da correção de medida, forma e superfície da furação, pode-se também corrigir o posicionamento, com uma melhora no perpendicularismo do furo. Sistemas de ferramentas deste tipo são utilizadas no brunimento de elementos de injeção de alta precisão, de engrenagens de bielas, como de cárter de direção [15;18].

#### **- Ferramentas de pedra única**

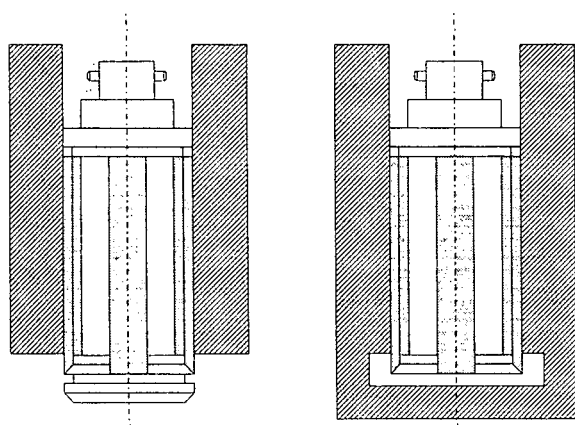
A característica construtiva mais importante deste tipo de ferramenta é a disposição assimétrica de duas barras de guia, posicionadas na parte posterior da ferramenta, visando o melhoramento da concentricidade, como mostra a figura 3.20. As barras de apoio que servem

para a absorção das forças são dispostas de tal forma que uma delas está praticamente justaposta à pedra de brunir, o que evita uma flexão da ferramenta [7]. Essas barras de guia são geralmente de metal-duro e atualmente, muitas vezes, revestidas de diamante com granulação fina, a fim de se obter uma alta vida útil. Devido à pequena altura de revestimento da pedra de brunir, este tipo de ferramenta é especialmente vantajoso nos limites de 2,5 à 30 mm [16]. Ferramentas de pedra única são preferencialmente empregadas na usinagem de furos passantes e furos cegos de precisão [16]. Ainda se tem a vantagem de que tanto a circularidade quanto a cilindricidade podem ser significativamente melhoradas, além de uma forma construtiva compacta sem exigir implementações mecânicas dispendiosas [7;26].



**Figura 3.20 - Ferramenta de pedra única**  
[7]

### - Ferramentas de múltiplas pedras



**Figura 3.21 - Ferramentas de múltiplas pedras**  
[16]

Atualmente existem à disposição ferramentas de brunir de várias réguas, para os mais diversificados campos de aplicação, de tal maneira que, para cada caso, se tenha a condição ótima de formação de cavaco. As ferramentas são especificadas segundo o comprimento e o diâmetro e estão associadas a uma série padrão, podendo ser equipadas com pedras comuns como também com pedras diamantadas. Tais ferramentas múltiplas com

pedras de diamante têm um grande campo de aplicação. Com pedras curtas são usinados os

chamados diâmetros "sobre quadrado", por exemplo, bielas e engrenagens. Ferramentas com pedras compridas são empregadas em serviço de brunimento de curso longo, como tubos de aços. Para furos cegos estas ferramentas são usadas sem o cone de entrada, figura 3.21 [16].

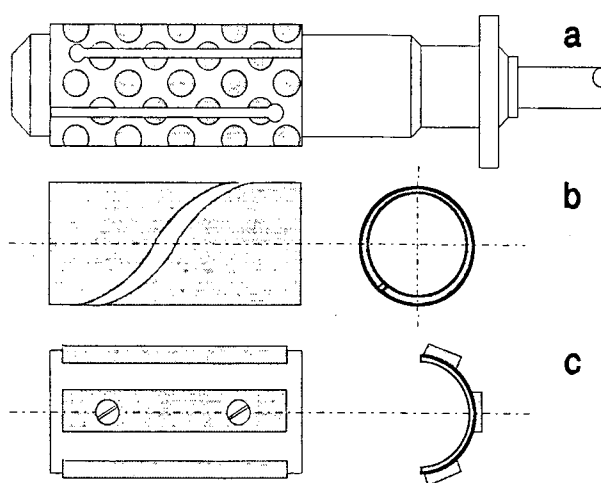
### - Ferramentas de casca

Estas ferramentas consistem basicamente de uma haste cônica e de uma bucha, onde são aplicados os abrasivos [17]. As buchas são geralmente diamantadas ou revestidas com grãos de CBN, proporcionando um grau de acabamento superior e rápida remoção. A granulometria do abrasivo empregado normalmente está relacionada com a remoção e o acabamento desejado [27].

O campo de aplicação destas ferramentas é determinado pelo material a usinar, dependendo do tipo e tamanho dos cavacos produzidos. Materiais que produzem cavacos

longos, como os aços moles, não são usinados economicamente por este processo, isto porque os cavacos longos não podem ser acolhidos na ranhura da bucha, figura 3.22a e 3.22b [17].

Há ainda ferramentas com réguas, galvânicas ou sinterizadas, que podem ser posicionadas rigidamente sobre uma casca semicilíndrica, figura 3.22c. A suavidade do trabalho com estas ferramentas leva a uma diminuição das vibrações e à redução do desgaste [7].



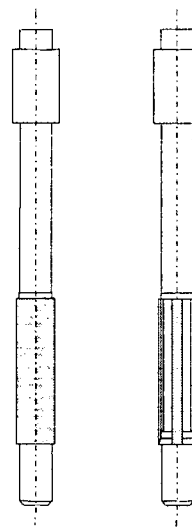
**Figura 3.22 - Ferramentas de casca**

### - Ferramentas maciças

Nos últimos anos foram desenvolvidas diversas pequenas ferramentas tornando possível o brunimento de furos com diâmetros apartir de 0,6mm.

As ferramentas maciças servem principalmente para rebarbar e alisar estes pequenos furos. Nesta série se integram as hastes de diamante que se adaptam para trabalhos de desbaste difíceis, principalmente para a usinagem de aços, metal duro, fundidos, vidros e metais leves.

Tais revestimentos podem ser selecionados com diferentes granulações, de acordo com a qualidade superficial desejada [16].



**Figura 3.23** - Ferramentas maciças

### - Ferramentas "Precidor"

Apesar de uma série de diferentes ferramentas ter sido apresentada ao longo deste ítem, atenção especial será dada a concepção "Precidor", justamente por ser esta o objeto de estudo deste trabalho.

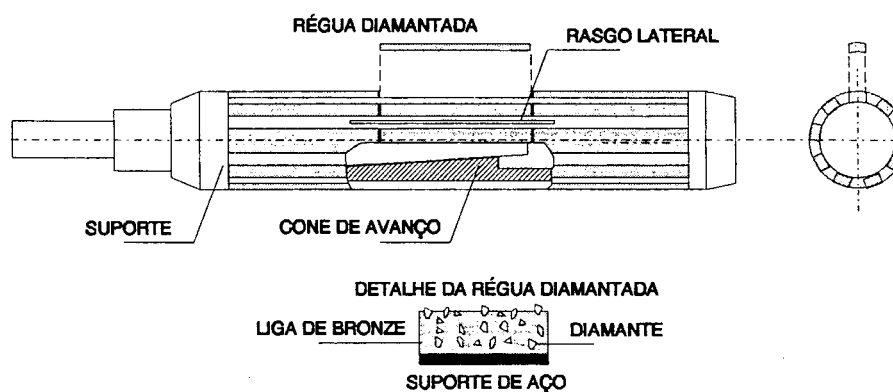
As ferramentas "Precidor" surgiram na Alemanha, como um desenvolvimento da indústria Nagel, nos anos 70. Nesta década refletiu-se muito a respeito da execução de trabalhos finos, em função da crescente exigência do mercado e melhoria dos sistemas de medição. A nova concepção de ferramental para o brunimento, utilizando pedras de diamante sobre um corpo de boa rigidez, trouxe consigo a possibilidade de produção de furos com elevada qualidade geométrica e dimensional.

### • Construção da ferramenta "Precidor"

A concepção "Precidor" consiste em um suporte rígido de alta estabilidade e vantajosa precisão, ao qual são fixadas as réguas diamantadas (pedras de brunir). Tais réguas apresentam elevado tempo de vida, o que implica o brunimento de aproximadamente 100.000 furos, antes de sua substituição.

Estas ferramentas apresentam três porções distintas. O primeiro terço é formado por uma região de guia, o segundo por uma região cônica de corte e o último por uma região cilíndrica de calibração. A leve conicidade apresentada na região central se justifica pelo desgaste proveniente do trabalho forçado, resultante da movimentação com avanço único. A expansão do diâmetro é mecânica e se dá pelo deslocamento de um elemento cônico na região de corte. Os aspectos gerais sobre os sistemas de expansão do diâmetro são abordados, a seguir, no item 3.6.3.

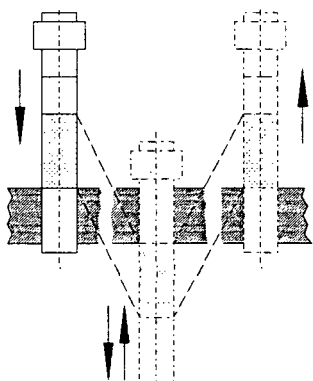
Uma característica importante desta forma construtiva é a presença de rasgos nas paredes da ferramenta, os quais facilitam o ajuste do diâmetro. Cabe salientar que ao contrário dos demais tipos de ferramentas, nos quais a expansão se dá pelo deslocamento radial das pedras de brunir ou de uma bucha abrasiva, nas ferramentas "Precidor" todo o corpo tem seu diâmetro aumentado [28]. A forma construtiva de uma ferramenta "Precidor" pode ser observada na figura 3.24.



**Figura 3.24** - Ferramenta "Precidor" e régua diamantada



### • Cinemática do processo de brunimento "Precidor"



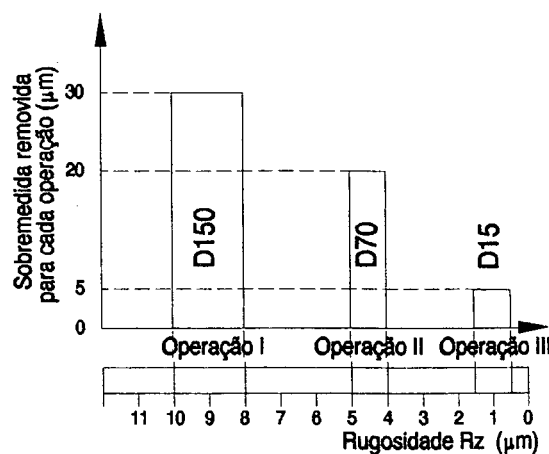
**Figura 3.25** - Cinemática do brunimento "Precidor"

No brunimento "Precidor", ao contrário dos demais processos de brunimento, a remoção de material se dá em um único ciclo de avanço da ferramenta. Isto caracteriza um processo de remoção intensiva, que distingue-se principalmente pelo emprego de parâmetros cinemáticos diferenciados. A velocidade tangencial situa-se na faixa aplicada ao brunimento de curso longo normal, que é de 10 a 20 m/min. No entanto, a velocidade de avanço é bem menor permanecendo em torno de 1 até 2 m/min. Percebe-se

que com esta composição o ângulo de cruzamento não é muito evidente [28;29]. O comprimento do curso deve ser ajustado de forma que a zona de corte da ferramenta ultrapasse a parte inferior do furo por completo, visando a calibração do elemento, figura 3.25.

### • Características do processo e resultados obtidos

Como foi comentado anteriormente este processo executa o corte em um único ciclo de avanço. Todavia, o brunimento em múltiplas etapas melhora a qualidade dos resultados, podendo ser realizado com o uso de máquinas de múltiplos estágios, onde em cada estação de trabalho tem-se uma ferramenta de granulometria diferente, figura 3.26.



**Figura 3.26** - Remoção e rugosidade obtidas em múltiplos estágios de brunimento

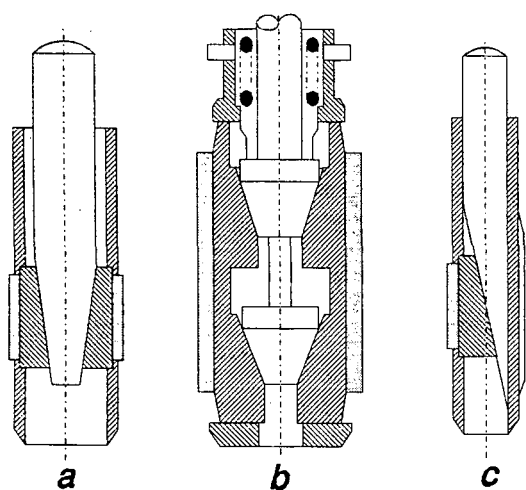
A divisão da usinagem em vários estágios é feita de acordo com a precisão

exigida pelo projeto do elemento e confere uma rugosidade própria, associada às características

da ferramenta [30]. As qualidades dimensional e geométrica obtidas com o uso de ferramentas "Precidor" são bastante elevadas. No brunimento de furos de ferro fundido pode-se alcançar precisão dimensional e geométrica na ordem de 0.001 a 0.002 mm, para uma remoção acima de 0.04 mm.

Este processo, consideravelmente simples, tem melhorado e muito os resultados obtidos na usinagem, principalmente no que se refere aos materiais mais leves. Além disto, praticamente qualquer tipo de furo pode ser brunido com o uso desta técnica, inclusive furos cegos com ou sem interrupções [31]. Atualmente o processo é bastante empregado na usinagem de furos de válvulas hidráulicas, mancais de blocos cilíndricos e bielas de grande e pequeno porte, ou seja, elementos onde se deseja uma constância de qualidade.

### 3.6.2. Sistemas de Expansão das Ferramentas de Brunir



**Figura 3.27** - Expansão por haste cônica (a), cones (b) e cunha (c)

As ferramenta de brunimento interno, em geral, possuem uma compensação de desgaste da pedra de brunir. Esta expansão do diâmetro pode ser implementada através de haste cônica, por cones de avanço, ou ainda por cunha de avanço, como pode ser observado na figura 3.27. O acionamento dos sistemas de avanço pode ser dado em função da força ou deslocamento. No primeiro caso é gerada uma força conhecida e, no segundo, um deslocamento conhecido. Assim, têm-se dois tipos de

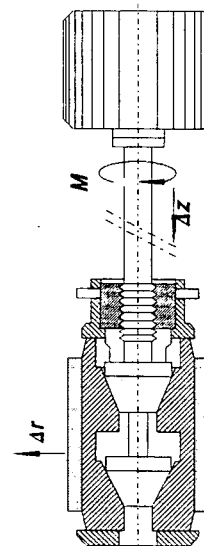
expansão do diâmetro da ferramenta: por acionamento hidráulico e por acionamento mecânico respectivamente.

### - Expansão por acionamento mecânico

Uma variedade de ferramentas de brunir emprega o sistema de expansão por deslocamento, podendo sua forma construtiva ser diferenciada.

Estas ferramentas são resultantes de diferentes tecnologias de fabricação, porém o funcionamento do sistema de expansão baseia-se no deslocamento de um elemento cônico, cuja posição é ajustada por mecanismos de rosca, figura 3.28.

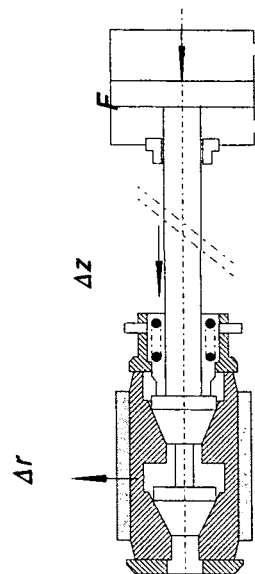
O diâmetro da ferramenta pode ser regulado manualmente com o uso de cabeçotes finos, ou ainda automaticamente por um motor passo-a-passo.



**Figura 3.28** - Sistema de expansão mecânica

### - Expansão por acionamento hidráulico

Os sistemas de expansão do diâmetro por acionamento hidráulico vêm sendo utilizados não somente para a compensação do desgaste sofrido pela pedra de brunir durante o processo de corte. São empregados, também, para a obtenção de uma determinada remoção de material, através da ação progressiva da ferramenta, que tem seu diâmetro aumentando gradualmente durante a usinagem. A expansão se deve a uma força que atua sobre o êmbolo conectado à haste cônica. À medida que a força aumenta, o êmbolo movimenta-se e a expansão é transmitida às pedras de brunir, figura 3.29.



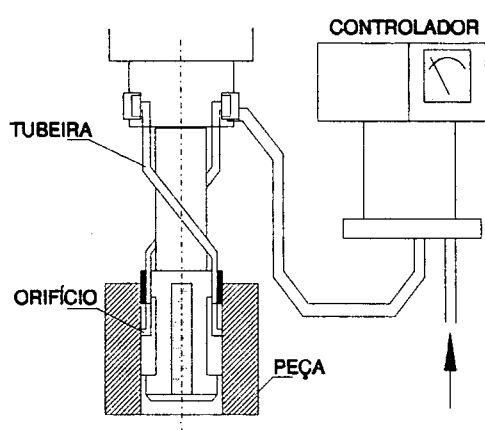
**Figura 3.29** - Sistema de expansão hidráulico

Em máquinas de alta produção, a expansão do diâmetro é controlada por sistemas de medição automáticos. Este controle, executado peça a peça de maneira contínua, possibilita a paralização da usinagem quando a dimensão final é alcançada.

Vários sistemas foram desenvolvidos para este fim, como é caso das buchas de calibração, pontos de contato e anéis medidores [23]. Todavia, os mais empregados são os medidores eletro-pneumáticos, cujo o funcionamento é baseado na diferença de pressão do ar que escoa na fenda existente entre os orifícios laterais da ferramenta e a superfície do furo, durante

o processo. A cada curso, o medidor registra uma pressão proporcional ao diâmetro do furo, transformada num sinal eletrônico interpretado por um controlador programável que interrompe o ciclo quando se atinge determinada pressão.

Os medidores eletropneumáticos adaptam-se bem às máquinas de múltiplos eixos, proporcionando ajustes na faixa de 1mm e tolerâncias dimensionais de  $7 \times 10^{-3}$  mm [23,32]. Um esquema do sistema pode ser observado na figura 3.30.



**Figura 3.30** - Esquema do medidor pneumático de diâmetro [36]

### 3.6.3. Preparação das Ferramentas de Brunir

Dependendo da classe de ferramenta utilizada, são necessários alguns ajustes antes de empregá-la no processo de brunimento. Muitas devem ter as pedras fixadas ao seu corpo, outras tantas precisam ser retificadas afim de obter uma dimensão próxima a que será usinada. E ainda, um procedimento posterior necessita ser aplicado para a obtenção de gumes mais ativos.

### **- Brasagem**

A brasagem é o processo usado na fixação das pedras de brunir ao corpo da ferramenta. Durante este procedimento deve-se tomar alguns cuidados, principalmente no que diz respeito ao posicionamento das pedras no suporte, de maneira a evitar distorções grosseiras.

A brasagem de pedras com abrasivos superduros pode ser executada com menor perda de tempo num dispositivo de aquecimento por indução. Entretanto, como poucas fábricas dispõem de tais equipamentos, as pedras de brunir são geralmente aquecidas com maçaricos e então fixadas. Para isso, emprega-se estanho normal, observando que toda a superfície de contato, entre o suporte e a pedra, tenha uma junção completa [16].

As pedras convencionais de brunimento não devem ser aquecidas com temperaturas muito elevadas, pois o pó de baquelite, elemento de junção entre o suporte e a pedra, queima em temperaturas acima de 220°C e perde a capacidade de aderência. As pedras com matéria sintética queimam, também, a esta temperatura [33].

### **- Retificação**

Para garantir a qualidade superficial exigida nos furos, as pontas dos grãos de diamante devem ser aparadas, de forma a haver um almejado aplainamento dos gumes. Esta operação na topografia do revestimento resulta no aumento dos raios de arredondamento dos grãos e, ao mesmo tempo, num aumento do número de gumes. Em consequência, é alcançada uma melhora da qualidade nas superfícies usinadas [17]. Faz-se também um nivelamento entre as pedras de brunir, para a remoção dos ressaltos gerados na montagem, conferindo uma forma cilíndrica ao longo do corpo da ferramenta.

Nesta operação, as ferramentas de brunimento são montadas num dispositivo especial de uma retificadora cilíndrica, sendo retificadas até se obter a medida determinada para a pedra de brunimento. A retificação é executada com rebolos de carboneto de silício ou de coríndum nobre, cujo tamanho de grão não deve exceder o do diamante da pedra, como pode ser

observado na tabela 3.5. Além disso, nesta operação, é importante que a velocidade do rebolo seja aproximadamente 1 a 3 m/s, uma vez que com velocidade muito alta ocorre um processo de empenamento da pedra de diamante, perdendo-se com isso o verdadeiro objetivo da operação.

**Tabela 3.5** - Granulometria do SiC para retificação de pedras diamantadas [26]

<b>GRANULOMETRIA</b>	
<b>FERRAMENTA</b>	<b>REBOLO (SiC)</b>
D15 - D50	325 - 400 mesh
D60 - D120	120 - 170 mesh
D150 - D200	45 - 80 mesh

### **- Afiação**

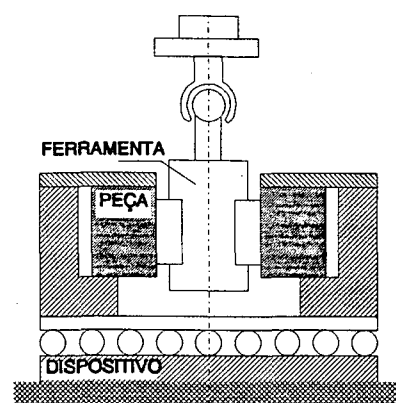
Após a retificação da ferramenta, afim de que os gumes dos diamantes novamente sobressaíam da liga, deve-se desgastar o ligante. Isto pode ser feito com pó de esmeril lamacento sobre uma placa, com uma pedra de afiar de cerâmica mole umedecida ou ainda, pelo emprego de pós abrasivos e uma bucha de ferro fundido, através de movimentos oscilatórios. Entretanto, é preciso observar que a granulação do pó de esmeril, de carboneto de silício ou coríndon e da pedra de afiar seja menor do que o grão de diamante. Esta indicação é de grande importância, uma vez que disso depende o rendimento da pedra de brunimento, principalmente com grãos de dimensões reduzidas.

Na afiação, durante o processo de brunimento, são introduzidos grãos de SiC ou coríndon, soltos e úmidos, entre a peça e a ferramenta. Com isto é obtido o efeito de lapidação que remove parcialmente o ligante, porém os grãos de CBN e diamantes não são removidos, aumentando-se a capacidade de corte da ferramenta [7;17;26].

### 3.6.4. Dispositivos de Fixação Peça-Ferramenta

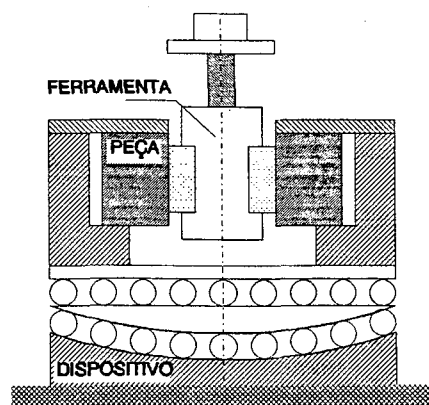
Tão importante quanto a concepção da ferramenta e sua adequação ao processo é o modo de como virá a atuar sobre a peça. No brunimento, objetiva-se que o furo usinado apoie e guie a ferramenta, cabendo ao eixo apenas a transmissão das forças. Para tanto, o par peça-ferramenta deve possuir vários graus de liberdade, permitindo o ajuste e condução entre eles. Existem três sistemas básicos de fixação, classificados de acordo com a mobilidade permitida à peça [28]:

**Dispositivo flutuante**- este sistema de fixação possibilita a movimentação da peça e ferramenta simultaneamente. A ferramenta desloca-se juntamente com o eixo, que possui uma junção rotulada. A peça encontra-se presa no centro do dispositivo, que permite movimento no plano, evitando a torção do conjunto. Na posição superior do dispositivo existe uma folga radial, facilitando a entrada e centragem da ferramenta, no início do ciclo. Sua aplicação restringe-se a peças pequenas e leves, figura 3.31.



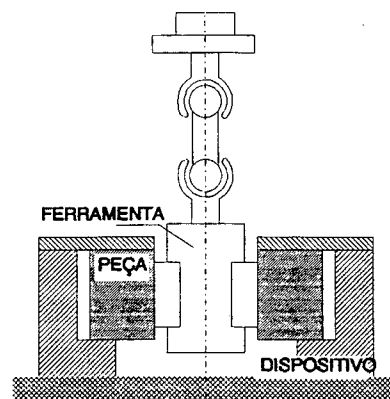
**Figura 3.31** - Dispositivo flutuante

**Dispositivo cardânico** - surgiu do aperfeiçoamento no dispositivo flutuante, aumentando a mobilidade da peça em dois graus de liberdade. Porém, a ferramenta neste caso é rígida, deslocando-se segundo o eixo geométrico da máquina. Apresenta a vantagem de não provocar grandes esforços sobre a peça, pois o centro de gravidade situa-se próximo ao plano cardânico. Seu emprego é recomendado a pequenas peças de elevada precisão, como elementos de bombas injetoras e válvulas hidráulicas, figura 3.32.



**Figura 3.32** - Dispositivo cardânico

**Dispositivo rígido** - apesar da designação, este sistema de fixação apresenta elevada mobilidade, sendo que todos os graus de liberdade são possibilitados pela ferramenta, ao passo que a peça encontra-se em uma posição fixa, presa por seu perfil. É aplicado na fabricação seriada, principalmente de peças robustas como blocos de motores, grandes buchas cilíndricas e cárter de direção hidráulica, figura 3.33 [29].



**Figura 3.33 - Dispositivo rígido**



### **3.7. GRANDEZAS DE ENTRADA NO PROCESSO DE BRUNIMENTO**

#### **3.7.1. - Generalidades**

Para empregar o processo de brunimento corretamente, se faz necessário o conhecimento e domínio dos mecanismos que influenciam o resultado do trabalho. As grandezas que envolvem estes mecanismos se dividem em dois grandes grupos :

##### **- Grandezas de entrada variáveis**

Este grupo de grandezas é responsável pela mecânica do brunimento e pode variar ao longo do processo. São elas a pressão de contato, velocidade de corte, comprimento do curso e o tempo de brunimento.

##### **- Grandezas de entrada do sistema**

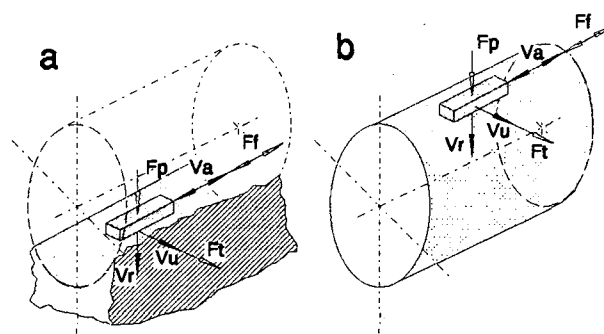
Estas grandezas apresentam-se de forma rígida, ou seja, não variam ao longo do processo, como é o caso da máquina, ferramentas, peça e fluido de corte. As características do processo, no entanto, são o resultado do somatório de todas as grandezas de entrada envolvidas [7].

Primeiramente serão abordadas as grandezas variáveis e em seguida as que estão relacionadas ao sistema.

#### **3.7.3. Pressão de Contato**

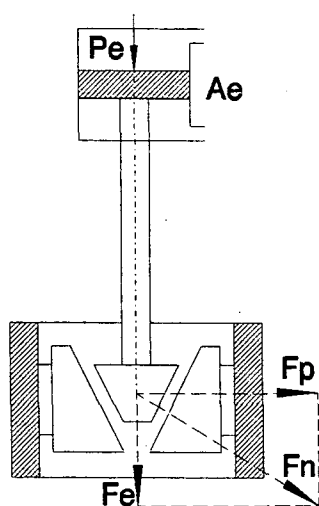
No brunimento de superfícies externas e internas, resultam forças que seguem a direção das componentes da velocidade de corte, o que implica uma força tangencial ( $F_t$ ) e uma força de avanço ( $F_f$ ), figura 3.34. Adicionalmente existe uma força normal à superfície usinada ( $F_p$ ), a qual gera uma pressão de contato ( $P_l$ ) entre a peça e a pedra de brunir [34]. Esta pressão faz com

que os grãos abrasivos da ferramenta penetrem uma determinada profundidade na superfície da peça, assegurando o processo de corte [1]. A pressão de contato é um dos importantes fatores que afetam a usinagem, precisão de forma e forças no processo de brunimento, influenciando decisivamente na qualidade superficial das peças trabalhadas [11;35]. Seu controle é, também, importante no brunimento de elementos com paredes delgadas, devido às possíveis deformações que ocorrem durante a usinagem. O conhecimento da pressão de contato permite o controle do processo, porém sua determinação não é simples. Como se observa na expressão,



**Figura 3.34** - Componentes da força de corte no brunimento [34]

$$Pl = \frac{F_p}{A_p}, \quad (3.7.1)$$



**Figura 3.35** - Forças e pressão em sistemas hidráulicos [7]

Pl depende da força normal  $F_p$ , difícil de ser medida. Em geral,  $F_p$  pode ser determinada com o uso de Strain Gauges colocados sobre a peça brunida [36], ou pelo uso de cristais piezelétricos posicionados sob as pedras de brunir [37]. Apesar destas possibilidades, os dois processos se traduzem em metodologias não muito simples de serem aplicadas. Em sistemas com expansão do diâmetro da ferramenta por acionamento mecânico, o emprego destes métodos, para a determinação de  $F_p$  e consequentemente Pl, é a solução. Para sistemas de

expansão por acionamento hidráulico, figura 3.35, a pressão de contato pode ser estimada em função da pressão dinâmica de expansão da ferramenta, desconsiderando-se as perdas de atrito entre seus elementos [36]. Esta estimativa é estabelecida em função das expressões,

$$F_p = \frac{1}{n} \cdot \frac{F_e}{\tan \beta}, \quad (3.7.2)$$

$$F_e = P_e \cdot A_e, \quad (3.7.3)$$

$$P_l = \frac{A_e \cdot P_e}{A_p \cdot \tan \beta}, \quad (3.7.4)$$

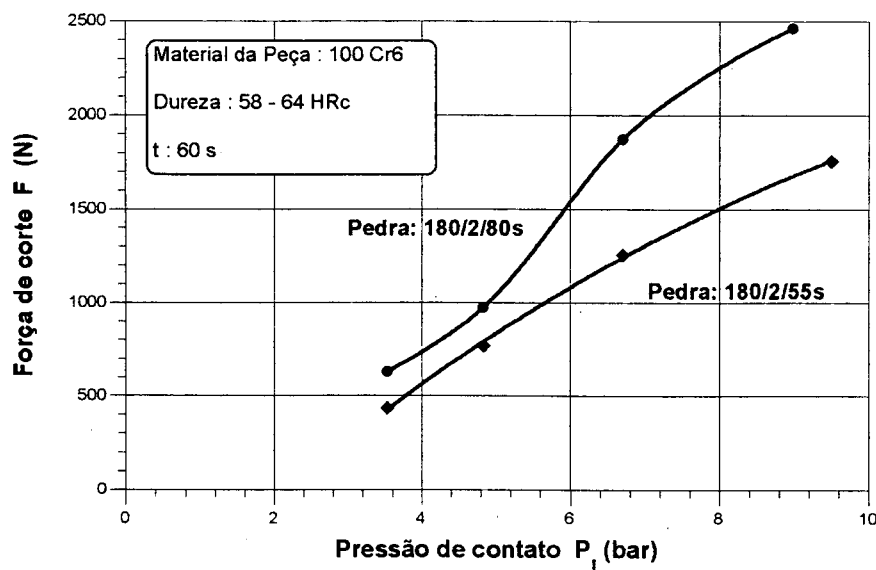
onde,

$A_e$ : Área do êmbolo;	$F_p$ : Força normal à superfície ;
$A_p$ : Área da pedra de brunir;	$P_e$ : Pressão hidráulica;
$\beta$ : Ângulo do cone;	$P_l$ : Pressão de contato;
$F_e$ : Força hidráulica do êmbolo;	$n$ : nº de pedras de brunir [7].

#### - Influência da pressão de contato na força de brunimento

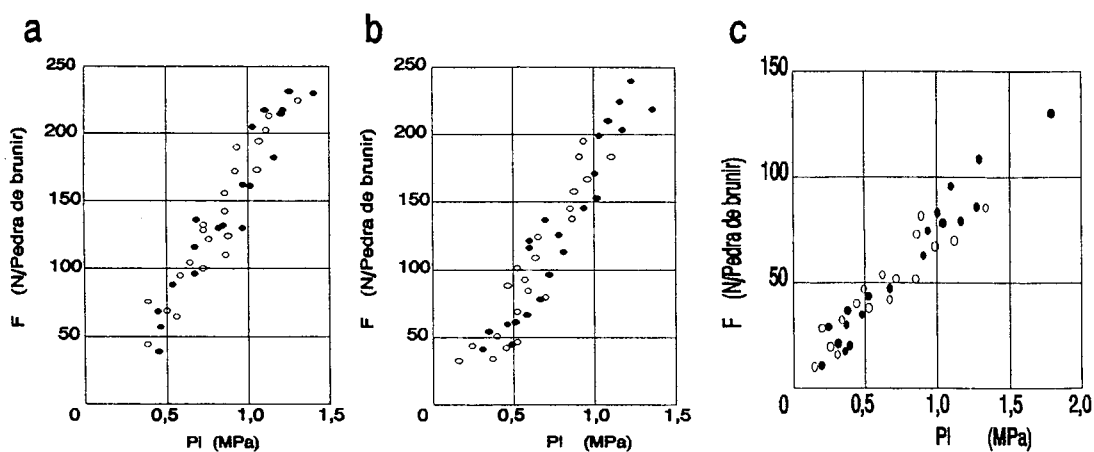
A força de corte no brunimento é influenciada pelas condições de usinagem do processo, especialmente pela pressão de contato. Deve-se entender como forças de corte, a soma vetorial das componentes tangencial e de avanço [36]. O aumento de  $P_l$  faz com que haja uma maior penetração dos grãos abrasivos da pedra de brunir na superfície da peça. Esta situação acontece até que se estabeleça a posição de equilíbrio entre a penetração dos grãos abrasivos e o número de grãos ativos correlacionados à pressão de reação [7]. A remoção da maior seção de usinagem, resultante de pressões mais elevadas, requer maiores esforços de usinagem. Evidencia-se, assim,

a influência de  $P_i$  sobre a força de corte no processo de brunimento, figura 3.36.



**Figura 3.36** - Força de corte em função da pressão de contato [7]

O comportamento da força de corte em relação a pressão de contato varia com o tempo de brunimento, o que acontece principalmente devido à mudança da capacidade de corte da pedra de brunir [36]. A figura 3.37 apresenta esta relação, onde os pontos brancos representam os esforços na entrada, e os pontos pretos os esforços na saída da ferramenta.



**Figura 3.37**- Relação entre força de corte e pressão de contato no tempo [36]

Observa-se que a razão entre a força e a pressão é bastante grande imediatamente após o início do brunimento, figura 3.37a, decresce um pouco transcorrido um minuto, figura 3.37b, apresentando-se bem menor após dez minutos de usinagem, figura 3.37c. Considera-se que isto ocorre devido aos mecanismos de desgaste da pedra de brunir. Na fase inicial, tem-se o corte dos gumes abrasivos na melhor condição, ou seja, logo após a dressagem.

A medida que o processo evolui, a ferramenta perde estas características, pois se instauram os mecanismos de desgaste abrasivo dos grãos e entupimento dos poros pelos cavacos removidos. Isto foi confirmado pela característica que a peça apresentou durante a usinagem. Nos primeiros três minutos foram visíveis as linhas entrecruzadas, inerentes ao processo, já para os dez minutos de usinagem a superfície apresentou-se espelhada e enegrecida [11].

#### **- Influência da pressão de contato na taxa de brunimento**

A avaliação da viabilidade econômica no brunimento é semelhante a que é feita na retificação. Sendo baseada além dos custos de máquinas e salários, no tempo e na taxa de brunimento [7]. Atualmente tanto o tempo de processo como a vida da ferramenta podem ser previstos pela taxa de brunimento, a qual é definida como,

$$Z' = \frac{\Delta V_m}{t \cdot A_s} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{s} \cdot \text{mm}^2} \right], \quad (3.7.5)$$

onde,

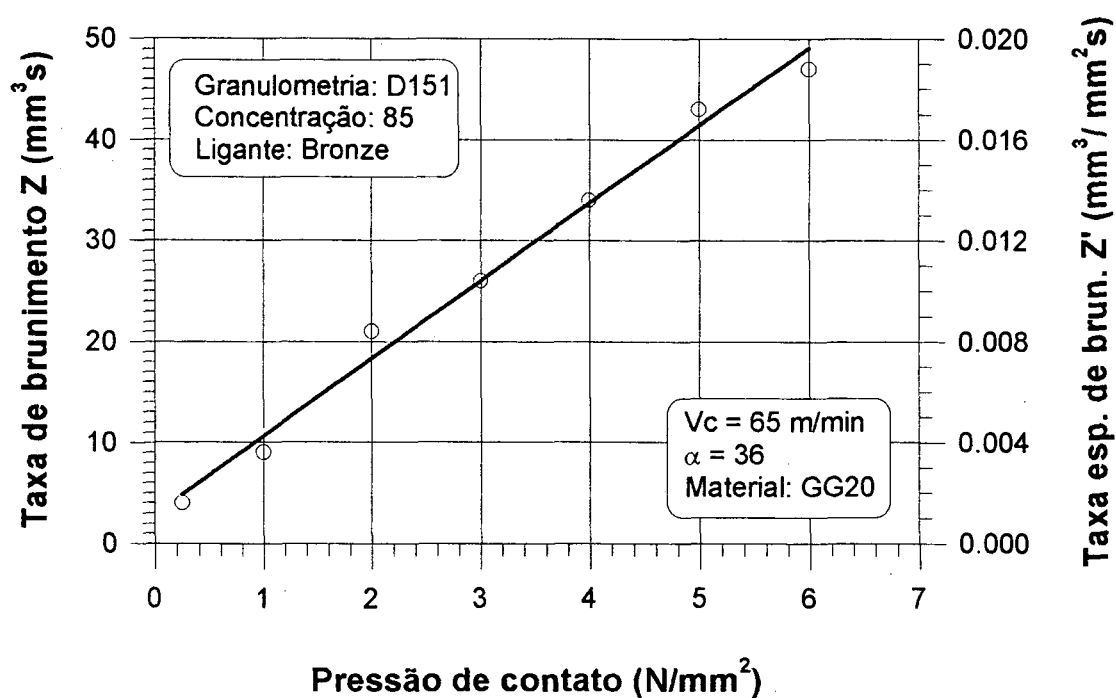
$Z'$  : taxa de brunimento;  $A_s$  : Área ativa da pedra de brunir;

$\Delta V_m$ : Volume de material removido;  $t$ : Tempo de brunimento.

A influência de  $P_l$  sobre a taxa de brunimento relaciona-se, também, a maior penetração da ferramenta na peça, provocando um maior número de gumes cinemáticos. Como resultado se obtém um aumento, não somente na seção de usinagem, mas também no número de cavacos

removidos [7]. Em consequência, o aumento da pressão de contato, permanecendo os demais parâmetros de entrada constantes, leva ao crescimento do volume de material removido por unidade de tempo.

No brunimento de furos de ferro fundido com ferramenta de diamante, o aumento da taxa de brunimento com a pressão de contato é aproximadamente linear, figura 3.38. Neste estudo, foi empregado um sistema hidráulico de expansão da ferramenta, o que permitiu um controle relativamente fácil da pressão de contato [38].

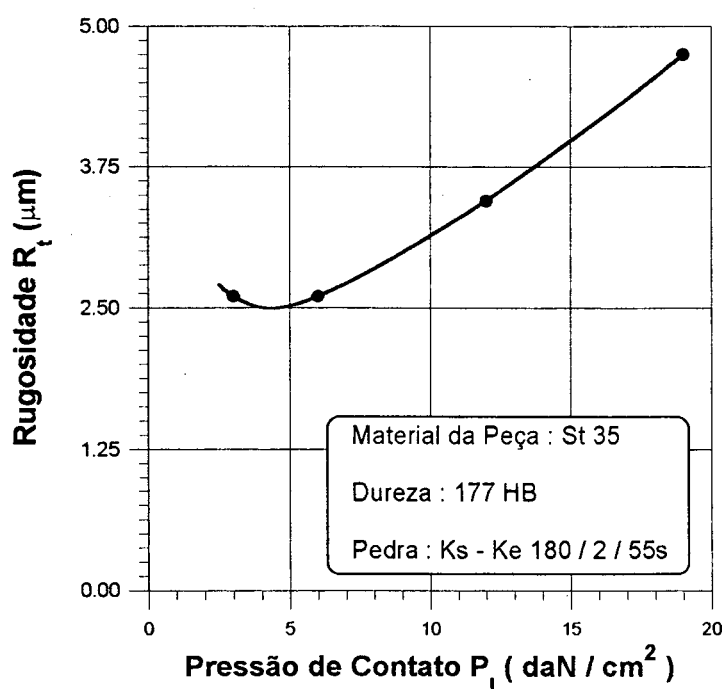


**Figura 3.38** - Influência da pressão de contato na taxa de brunimento [38]

#### - Influência da pressão de contato na qualidade superficial

A qualidade superficial é analisada, neste item, apenas no aspecto da textura superficial. Isto se deve ao fato de que, a integridade da camada superficial é muito pouco afetada durante o processo de brunimento e alterações metalúrgicas ou mesmo tensões residuais são pouco evidentes no decorrer da usinagem. A rugosidade da superfície brunida cresce com a pressão,

principalmente devido à quebra dos grãos, em condições de corte mais severas. O estilhaçamento e arrancamento dos grãos, em virtude de pressões de contato mais elevadas, leva a um processo de auto-afiação da ferramenta [39]. Em decorrência, é gerada uma maior agressividade dos grãos abrasivos contra a peça usinada, o que modifica sensivelmente as suas características superficiais [7]. Tal comportamento pode ser analisado com o auxílio da figura 3.39.

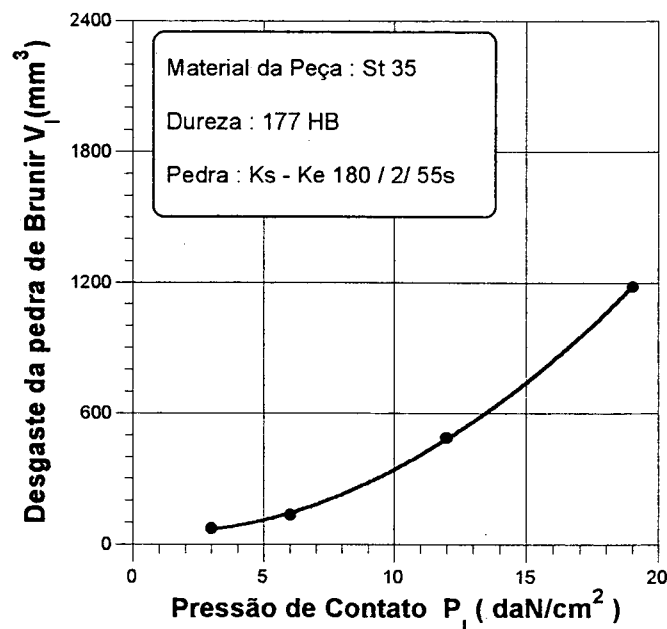


**Figura 3.39** - Rugosidade em dependência da pressão de contato [7]

#### **- Influência da pressão de contato no desgaste da ferramenta**

O desgaste da ferramenta tem sua fundamentação em causas bem semelhantes às da rugosidade da peça, quando se tratando de pressão de contato. Os mecanismos de desgaste se acentuam com a elevação da  $P_l$ , e de acordo com as características da pedra, pode ser mais significativo o lascamento, a abrasão ou o desprendimento dos grãos [10]. Em pressões de contato mais elevadas, as solicitações mecânicas no grão abrasivo assumem maiores proporções, figura 3.40.

Estes esforços acabam provocando a sua quebra, como também o seu arrancamento do interior do ligante [7].



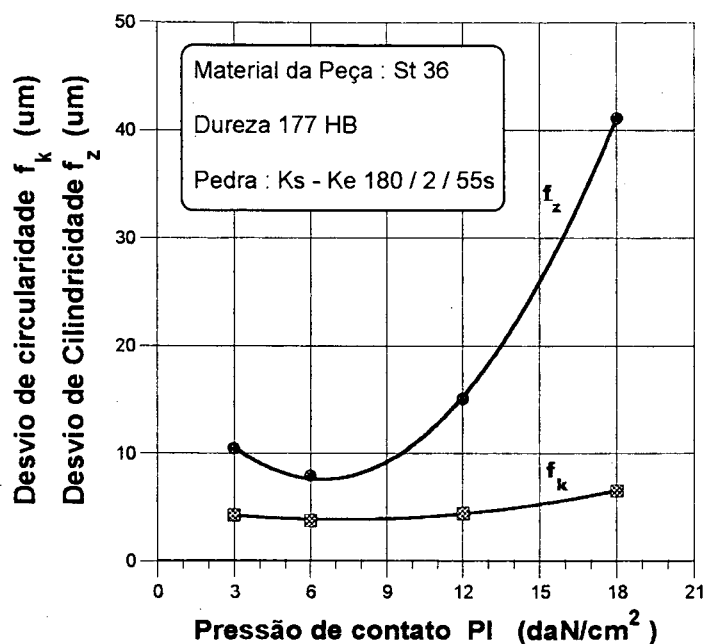
**Figura 3.40** - Desgaste da ferramenta em função da pressão de contato [7]

#### - Influência da pressão de contato na forma resultante

Pressões de contato elevadas geram, ainda, implicações na cilindridade e circularidade do furo brunido, sendo que para esta última as variações são bem menos sensíveis, figura 3.41. Os erros de cilindridade são decorrentes principalmente do maior diâmetro gerado na parte superior do furo, devido ao processo de tombamento da ferramenta.

O tombamento consiste no desvio do eixo da ferramenta em relação ao eixo do furo, em função da diferença de esforços exercidos pela região superior e inferior da ferramenta. Como na parte superior a força é maior, a pressão de contato localizada cresce e a taxa de remoção torna-se mais elevada, levando ao aumento da dimensão do diâmetro de entrada [7].





**Figura 3.41** - Influência da pressão de contato sobre os erros de forma [7]

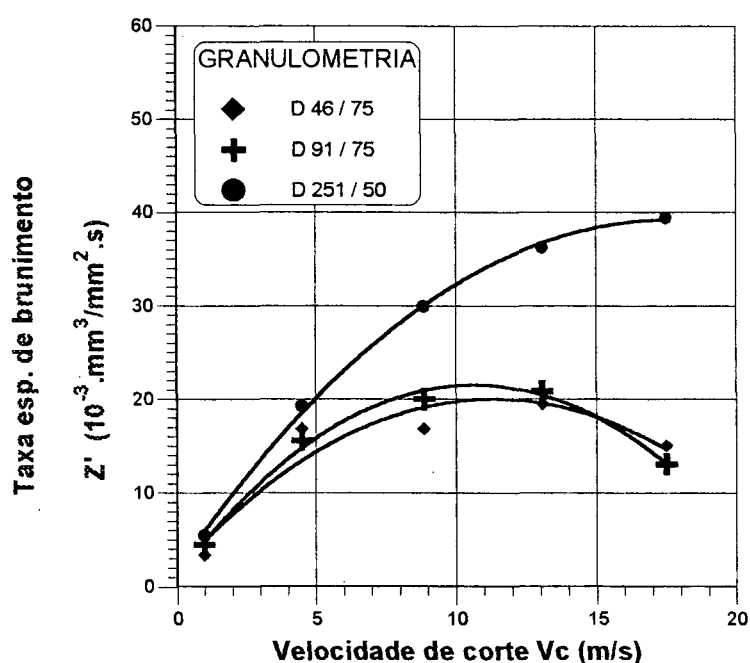
### 3.7.3. Velocidade de Corte

A velocidade de corte é uma grandeza de entrada que influencia consideravelmente no processo de brunimento. Alterações na velocidade causam profundas modificações na taxa de brunimento, no desgaste da ferramenta, na qualidade superficial e nas características geométricas da peça usinada.

#### - Influência da velocidade de corte na taxa de brunimento

Sabe-se que no brunimento, a pressão de contato estabelece o número de cavacos removidos e a seção de usinagem dos cavacos. Para uma dada pressão de contato, a velocidade de corte determina o comprimento médio dos cavacos usinados e a quantidade de cavacos removidos por unidade de tempo, em outras palavras, a taxa de brunimento [7]. A figura 3.42 mostra o comportamento da taxa de remoção em função da velocidade de corte no brunimento

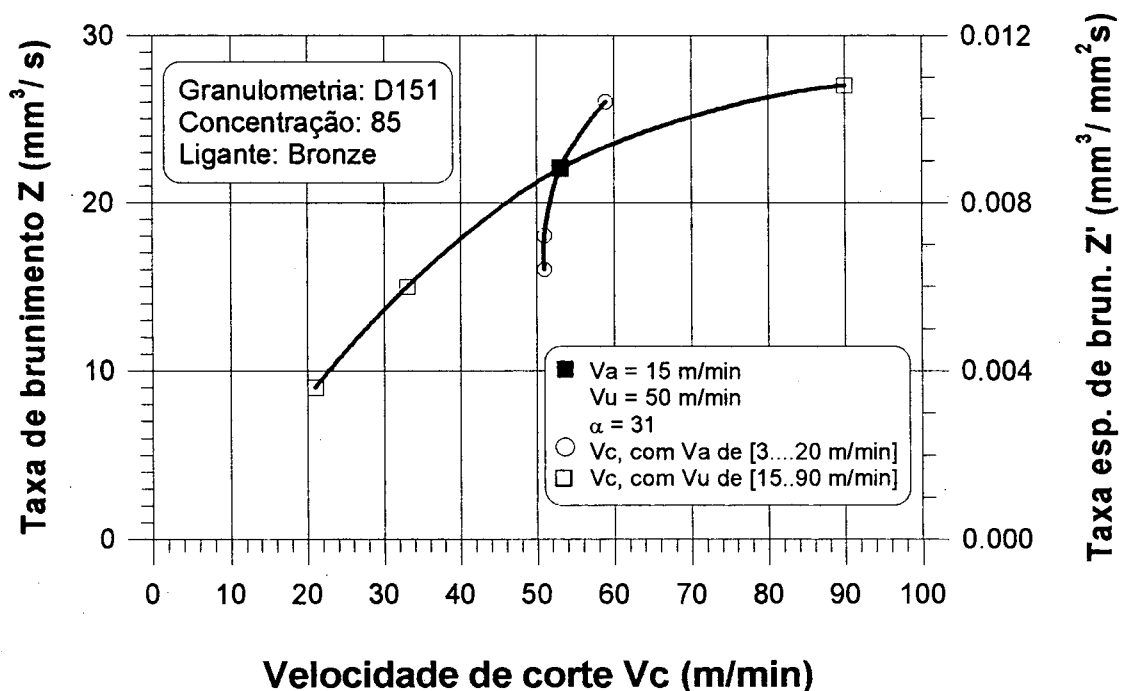
de ferro fundido com três diferentes pedras de diamante. Observa-se que para as três pedras de brunimento D251, D91 e D46, a característica das curvas é similar. A taxa de remoção cresce com a velocidade, atinge um valor máximo e posteriormente decresce [35]. Tal comportamento resulta da formação de um filme lubrificante, entre a superfície da peça e da ferramenta, o que propicia o desenvolvimento de uma pressão hidrodinâmica cada vez maior. Esta pressão se opõe à penetração da pedra de brunir, ocasionando a redução da taxa de brunimento. Contudo, estabelece uma melhora da qualidade superficial [40]. Caso ocorra uma compensação total entre as pressões de contato e hidrodinâmica, a ferramenta afasta-se totalmente da superfície da peça e ocorre o fenômeno de aquaplanagem, que relaciona-se com a velocidade de corte, a rugosidade do par peça-ferramenta e a viscosidade do fluido lubrificante.



**Figura 3.42** - Influência da velocidade na taxa específica de brunimento [35]

Atenção especial deve ser dada ao ângulo de cruzamento  $\alpha$ . Verifica-se que a característica da curva, taxa de remoção em relação a velocidade de corte, varia com a modificação do ângulo de cruzamento. Estas alterações na taxa de brunimento são decorrentes de fenômenos próprios

da ferramenta, na qual solicitações e desgaste variam com a posição, sentido e valor do ângulo  $\alpha$  [7]. Na prática, com relação à taxa efetiva de brunimento, os ângulos de cruzamento foram otimizados na faixa de  $40^\circ$  a  $75^\circ$ , independente de tamanho de grão, dureza e pressão de contato [38]. A composição da velocidade de corte e conseqüente diferenciação do ângulo  $\alpha$ , resulta em comportamentos de corte distintos, figura 3.43. Assim, através do aumento da velocidade de avanço mantendo-se a rotação da ferramenta constante, são obtidos ângulos de cruzamento grandes, enquanto que para o aumento da rotação permanecendo a velocidade de avanço constante, ocorre a diminuição de  $\alpha$ . Para maiores remoções é recomendado o aumento do ângulo de cruzamento, porém os valores da velocidade de avanço não devem ser demasiados, já que acontece a inversão no sentido da ferramenta no final de cada avanço, o que acarreta uma mudança drástica do ângulo  $\alpha$  [38].



**Figura 3.43** - Influência da composição da velocidade na taxa de remoção [38]

### - Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta

A figura 3.44 representa o desgaste da ferramenta em função das componentes de velocidade de corte e do ângulo de cruzamento  $\alpha$ , no brunimento de curso longo. Observa-se que para velocidades tangenciais mais baixas, o desgaste sofrido pela ferramenta é bem mais significativo que nas altas. Este comportamento é similar, para as três velocidades axiais estudadas e deve-se ao aumento do ângulo de cruzamento decorrente da composição da velocidade de corte. As solicitações mecânicas que incidem sobre os grãos, em tal condição, são elevadas e propiciam grandes níveis de desgaste. Guardadas as proporções, podem ser benéficas devido às melhores características de remoção que possivelmente serão alcançadas, uma vez que os grãos abrasivos encontram-se mais ativos e afiados. Deve-se considerar, no entanto, que o desgaste elevado levará à perda da capacidade de corte da ferramenta [7;12].

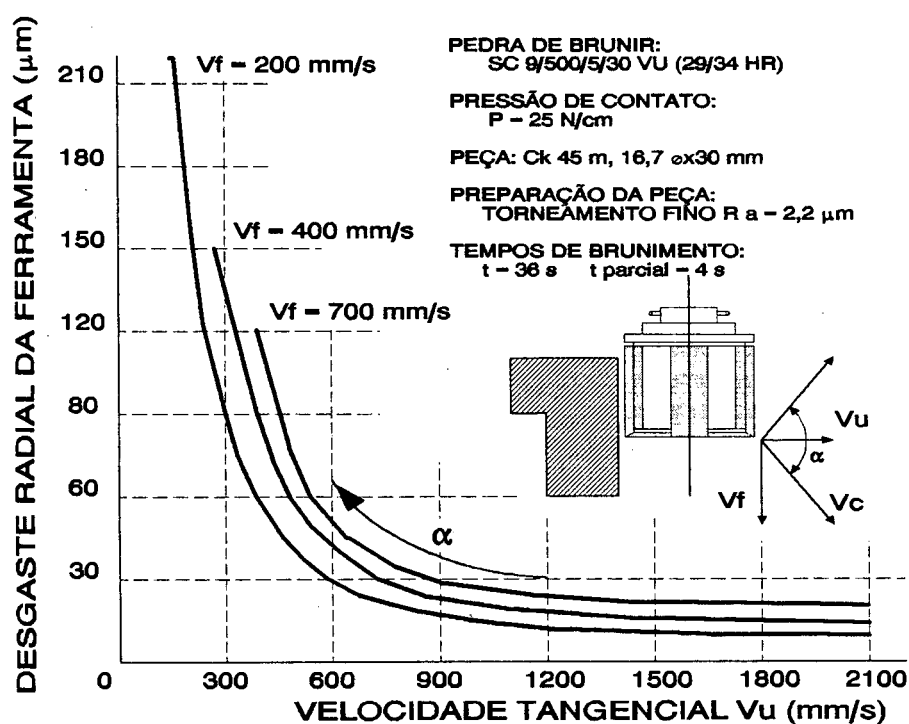


Figura 3.44 - Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta [7]

### - Influência da velocidade de corte na qualidade superficial

A textura superficial pode, também, ser analisada como função da velocidade de corte, tal relação é mostrada na figura 3.45. Percebe-se que existe uma redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, assim pode-se dizer que  $V_c$  age de forma positiva sobre a qualidade superficial da peça.

Deve-se levar em consideração que a rugosidade representada não é a melhor rugosidade, obtida com uma determinada velocidade, mas sim que os valores de rugosidade representados são decorrentes de um tempo de operação. Esta questão torna-se mais clara ao se analisar a rugosidade obtida com a mesma velocidade de corte, mas para diferentes tempos de brunimento. As curvas inferiores do gráfico, obtidas após 36s de brunimento, mostram que depois de uma redução progressiva de material, a influência da velocidade de corte se reduz consideravelmente. Para melhor comparação dos níveis de rugosidade, devem ser estabelecidas condições nas quais a situação inicial da peça não influencie no resultado de trabalho [7].

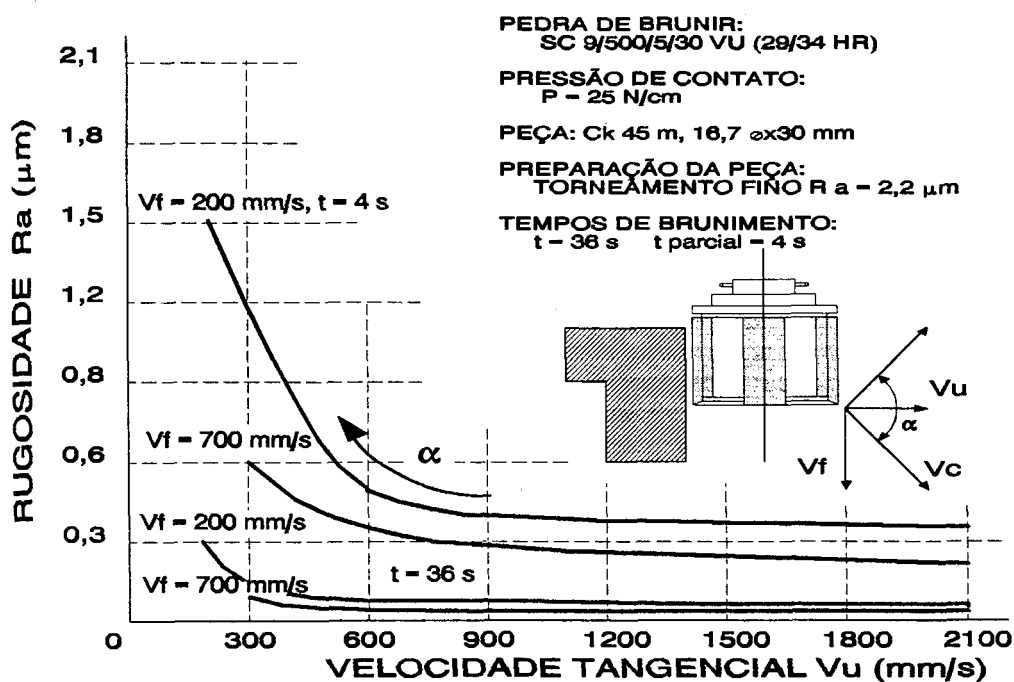


Figura 3.45 - Influência da relação da velocidade sobre a rugosidade [7]

### **- Influência da velocidade de corte na forma resultante**

A melhoria da forma, cilindridade e circularidade, é também correlacionada com a composição da velocidade de corte. Pesquisas demonstram que tanto a velocidade tangencial quanto a velocidade axial podem ser otimizadas. A otimização destas velocidades leva a um ângulo de cruzamento de aproximadamente  $45^\circ$ . A dependência entre o ângulo de cruzamento e o erro de forma pode ser explicado pelo fato de que o volume efetivo usinado por unidade de tempo alcança valores maiores para ( $\alpha = 45^\circ$ ), na maioria dos processos de brunimento. Tais valores otimizados não podem ser generalizados. Porém, é fácil entender que uma taxa de brunimento elevada é o pré-requisito para a redução dos erros de forma.

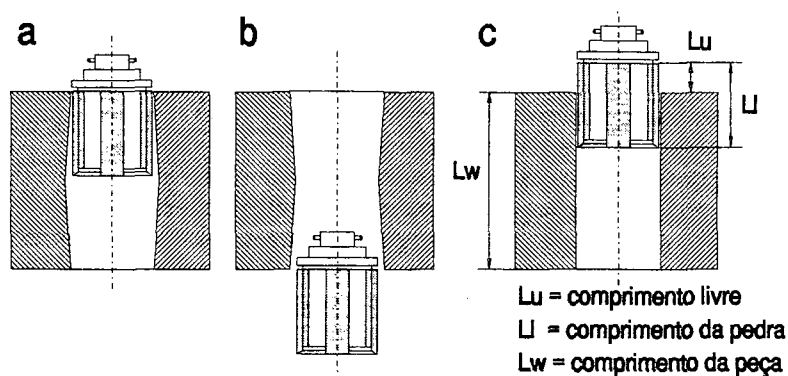
#### **3.7.4. Comprimento do curso**

A escolha adequada do comprimento do curso (LI) tem importância básica sobre os resultados obtidos no processo, principalmente no que diz respeito às formas resultantes no brunimento de curso longo. Sendo assim, o curso deve ser estabelecido de modo que os erros de forma, principalmente erros de cilindridade, sejam minimizados. A análise de duas situações extremas pode auxiliar na interpretação da influência do curso no erro de cilindridade do furo brunido.

Na primeira situação, a ferramenta tem o sentido do movimento axial invertido tão logo atinja uma das extremidades da peça brunida. Assim, o comprimento livre da ferramenta (Lu) é nulo, pois a pedra não ultrapassa as aberturas do furo. Como a pressão de contato permanece constante ao longo do processo, em todo comprimento brunido e nas extremidades do furo, há um menor número de grãos abrasivos atuantes, a taxa de remoção de material nestes pontos é menor, ocasionando uma redução nos diâmetros de entrada e saída do furo, figura 3.46a.

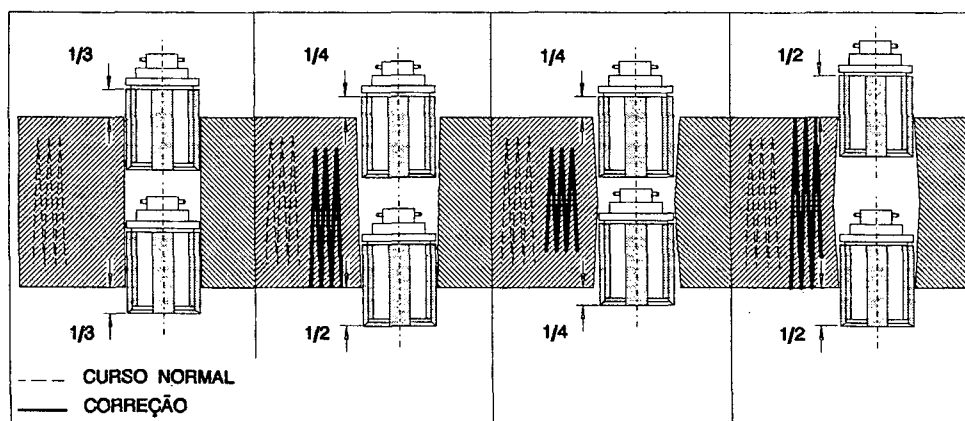
O outro caso acontece quando a ferramenta ultrapassa totalmente as extremidades, da peça brunida, antes de ser procedida a inversão no sentido do movimento axial. Durante a saída da ferramenta de dentro do furo, a pressão de contato assume, progressivamente, valores mais

elevados. Isto porque a força radial permanece constante, no entanto, distribuída em uma área de contato que decresce continuamente. A elevação dos valores da pressão de contato provoca o aumento da taxa efetiva de brunimento nas regiões extremas, causando o alargamento dos diâmetros de saída e entrada, figura 3.46 b.



**Figura 3.46** - Situações extremas da influência do curso na forma do furo

A otimização da forma cilíndrica pode ser alcançada através da ajustagem adequada do curso de brunimento. Faz-se isto estabelecendo o comprimento livre ( $L_u$ ). De uma forma genérica podem ser empregadas as condições apresentadas na figura 3.47, onde se aconselha uma estratégia diferenciada para cada defeito observado no processo, furo cônico, boca de sino ou barrilete [26]. Cabe salientar que para a otimização do curso, deve-se desenvolver um estudo detalhado do comprimento livre ( $L_u$ ) aconselhado para uma situação específica de processo.



**Figura 3.47** - Correção dos defeitos do brunimento pela adequação do curso [26]

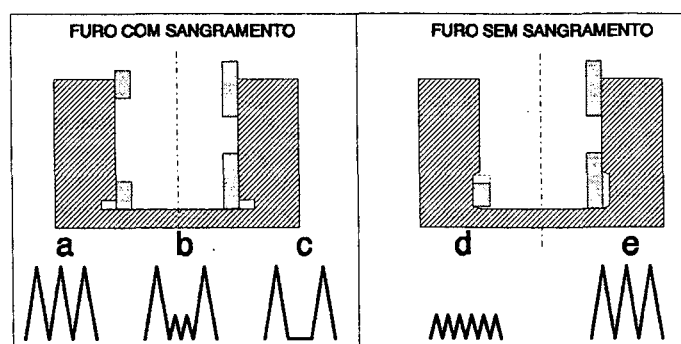
No brunimento de furos cegos, a otimização do comprimento livre é limitada pelo projeto da peça. Para evitar a restrição do diâmetro inferior, deve-se empregar estratégias alternativas que propiciem uma boa qualidade ao furo brunido. De acordo com a configuração do furo pode-se proceder das seguintes maneiras:

#### • Furos cegos com sangramento

É usual neste caso empregar pedras de brunir curtas, estabelecendo um curso normal, ou seja, procedendo a saída de um terço da ferramenta tanto na extremidade superior, quanto na inferior do furo, figura 3.48a. Outra possibilidade é utilizar-se do brunimento secundário. Este consiste em brunir a peça normalmente, ao longo de seu comprimento, e em determinados intervalos, executar movimentos com uma menor amplitude, na base do furo, figura 3.48 b [41]. Por último, apresenta-se o brunimento com retardo de curso, no qual o tempo de permanência da ferramenta no fundo do furo é aumentado, ocasionando uma maior remoção de material. Este artifício deve ser desativado pouco antes da dimensão final ser atingida, visando-se garantir uma topografia homogênea ao longo da superfície, figura 3.48c [7].

#### • Furos cegos sem sangramento

Esta configuração exige que o trabalho seja efetuado com duas ferramentas de comprimentos diferentes. Com a primeira, o diâmetro livre no fundo do furo é brunido até atingir a dimensão final, figura 3.48d. A segunda ferramenta executa o brunimento normal, na porção superior do furo. Resguardando os comprimentos que devem ser executados para que uma boa geometria seja obtida, figura 3.48e [41].



**Figura 3.48** - Correção da cilindridade no brunimento de furos cegos [41].



### **3.7.5 Tempo de Brunimento**

Como não poderia deixar de ser, o tempo de brunimento também influencia no processo, e estas influências sobre o brunimento serão expostas a seguir.

#### **- Influência do tempo de brunimento na qualidade superficial**

No brunimento, a rugosidade é principalmente influenciada pelo tempo de operação. Partindo-se de uma rugosidade inicial do processo anterior, tem-se uma melhora na qualidade superficial através do processo de brunimento. No início da usinagem, os picos de rugosidade são eliminados rapidamente, e a rugosidade tende assintoticamente a um valor final. Este valor depende primariamente da ferramenta e da cinemática do processo, sendo praticamente independente da rugosidade inicial da peça.

#### **- Influência do tempo de brunimento na taxa de remoção**

No início do processo de brunimento, a ferramenta não se encontra totalmente ajustada à superfície usinada, porque encosta somente nos picos mais elevados de rugosidade. Como a área de contato entre a peça e ferramenta é pequena, a pressão localizada nos picos assume valores muito elevados e, em consequência disto, tem-se uma taxa efetiva de brunimento bastante alta, no começo da retirada de material. No decorrer do processo a área de contato aumenta, havendo uma redução na pressão de contato e na taxa efetiva de brunimento.

#### **- Influência do tempo de brunimento no desgaste da ferramenta**

O comportamento do desgaste da pedra de brunir é semelhante ao da taxa de brunimento, no que diz respeito ao tempo de usinagem. Deste modo, no início do processo, a usinagem anterior influencia consideravelmente o desgaste abrasivo da pedra. Isto relaciona-se, também,

aos picos de rugosidade inicial, os quais levam à quebra dos grãos abrasivos da pedra de brunir. Porém, com o alisamento posterior da superfície e com a distribuição mais regular da pressão de contato, o desgaste diminui quase que linearmente ao longo do tempo de trabalho.

A figura 3.49 mostra as curvas que caracterizam a influência do tempo no processo de brunimento.

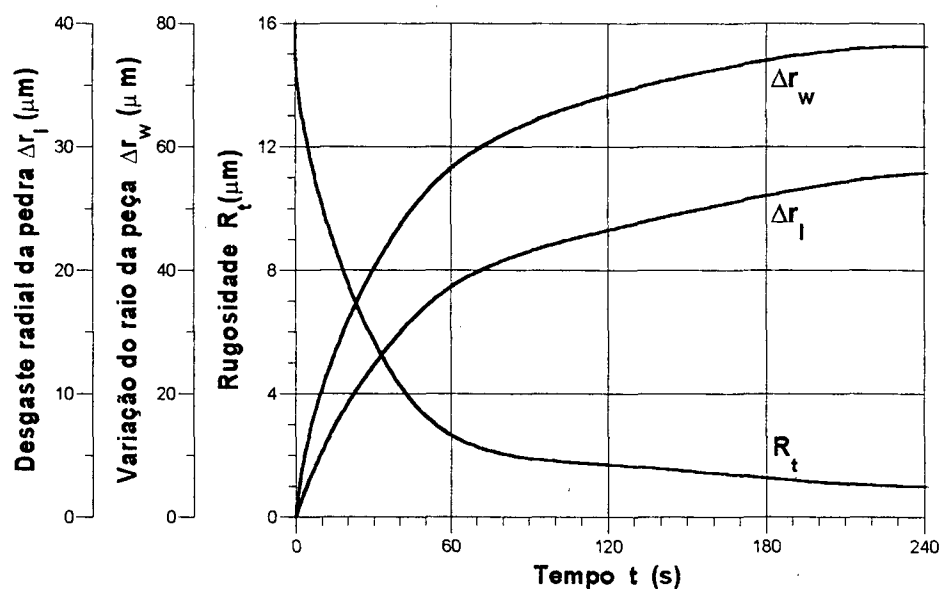


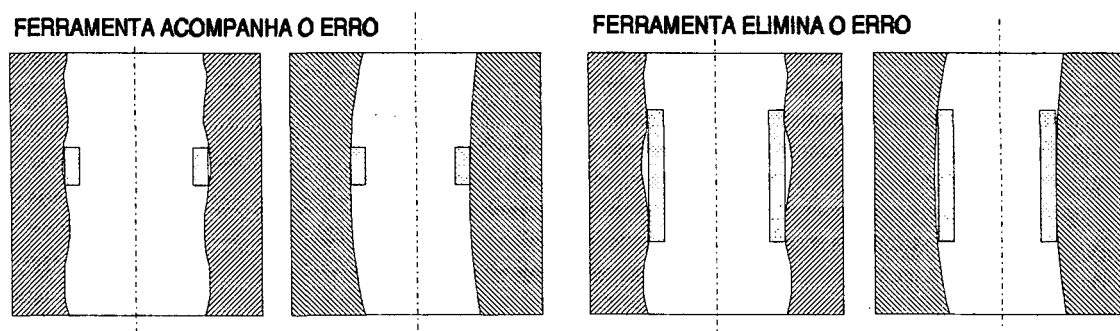
Figura 3.49 - Remoção de material em função do tempo de trabalho [7]

### 3.7.6. Ferramentas

No brunimento, questões como erros de forma e baixa qualidade superficial são, por vezes, decorrentes das características da ferramenta empregada, tendo a concepção da máquina pouca influência sobre problemas ocorridos no processo. Procedimentos definidos, que envolvem simples ajustes nos parâmetros variáveis da ferramenta, podem corrigir os erros de forma mais frequentes encontrados no processo de brunimento.

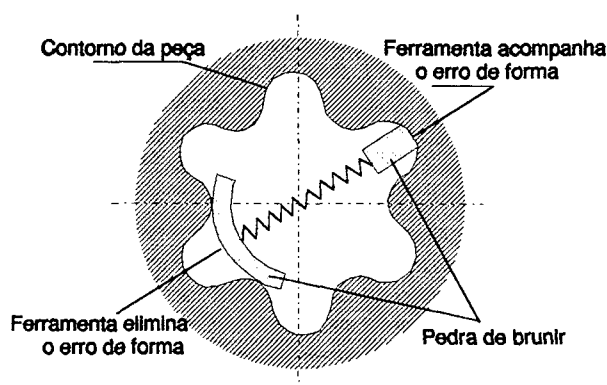
#### - Influências da geometria da ferramenta

A circularidade e a cilindridade da peça estão fortemente relacionadas às características da ferramenta que executa a operação. A correção de erros de forma e mesmo a prevenção destes erros pode ser obtida pela utilização de ferramentas com geometria adequada para o processo. O comprimento das réguas de brunir tem grande importância neste contexto, figura 3.50, visto que, se a régua de brunir for extremamente curta a mesma acompanha o contorno do erro de forma, desgastando picos e vales. Outra desvantagem das ferramentas curtas é o aumento do erro de tombamento, ocasionando alargamento excessivo na extremidade superior do furo. A otimização da forma pode ser alcançada com o uso de ferramentas de maior comprimento. Ferramentas mais longas apoiam-se sobre vários picos de ondulação, o que evita a remoção de material nos vales existentes. Como o material é removido apenas nas regiões sobressalentes, processa-se a correção de cilindridade da peça [7;42].



**Figura 3.50** - Influência do comprimento da ferramenta no erro de cilindridade [42]

Assim como o comprimento da ferramenta, a largura também é muito importante no que tange à precisão da forma obtida, especialmente a circularidade, figura 3.51. Ferramentas que se apoiam simultaneamente em duas ou mais cristas de ondulações conferem maior precisão de forma à peça, porque esta acaba assumindo a circularidade prescrita pela ferramenta de brunimento. Pedras mais largas também proporcionam baixos índices de vibração e ruído, já que se apoiam em um número maior de pontos. Esta característica propicia, conjuntamente, maior suavidade de trabalho e redução do desgaste da ferramenta.



**Figura 3.51-** Influência da largura da ferramenta sobre o erro de circularidade [42]

### - Influência do tamanho de grão

Em conjunto com as propriedades do abrasivo, a forma e o tamanho individual das partículas tem uma importante influência nas características e performance da ferramenta. Os grãos alongados, os quais tem uma aparência fina e afiada, são muito friáveis e comumente apresentam imperfeições estruturais e trincas. Grãos moletados são mais arredondados, robustos e fortes que os anteriores, mas são menos agressivos. Já os grãos regulares apresentam características intermediárias, em relação aos outros dois [43].

Com relação à granulometria do abrasivo, pode-se dizer que quanto maior o grão, maiores serão as influências negativas sobre precisão de forma, principalmente a cilindridade. O aumento do tamanho do grão leva, igualmente, a um volume efetivo usinado maior, à diminuição

da qualidade superficial e a um menor desgaste. A otimização destes parâmetros é exigida principalmente, no brunimento de acabamento. Para tanto, a adequação do tamanho de grão requer, por muitas vezes, uma grande quantidade de ensaios [18;43].

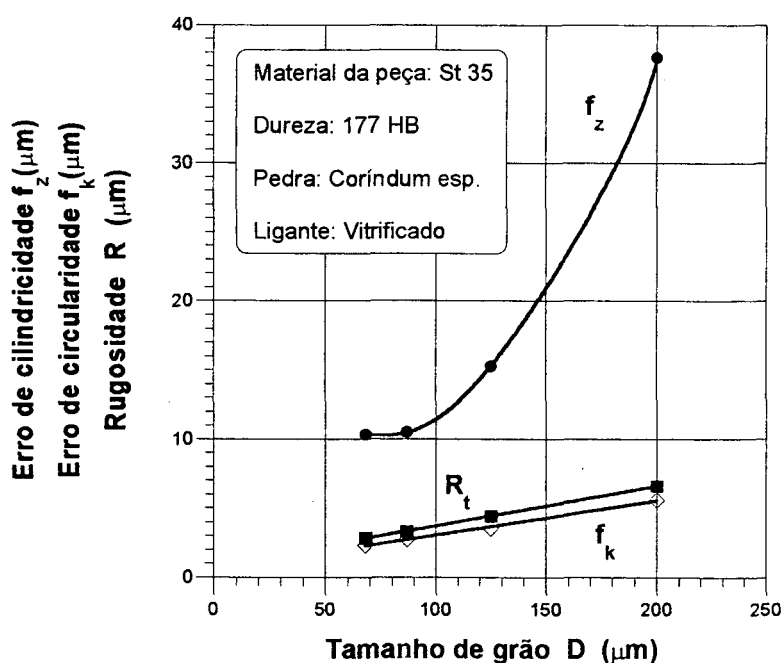


Figura 3.52 - Desvio de forma e rugosidade em função do tamanho de grão [7]

### - Influência da concentração de grãos

A concentração do abrasivo, em uma pedra de brunir, tem a mesma influência que a dimensão do grão, ou seja, manifesta-se sobre o rendimento de corte, rugosidade e vida útil da ferramenta. Uma baixa concentração apresenta poucos grãos, possuindo um bom rendimento de corte, entretanto uma alta rugosidade e uma vida útil baixa. Ao contrário, uma alta concentração possui muitos grãos, resultando em um rendimento de corte e uma rugosidade menor, mas uma vida útil alta [44].

### **- Influência da dureza do grão**

A dureza pode ser definida como a resistência do grão à quebra total. Com relação a este fato, fica claro que a diminuição da dureza induz ao aumento do desgaste da ferramenta. O desgaste crescente, leva a um processo de auto-afiação constante. Isto inicialmente contribui para o crescimento da taxa de brunimento, já que novos grãos abrasivos entram em ação continuamente.

Uma dureza elevada do abrasivo induz o cegamento dos grãos antes que eles quebrem. Os grãos, não mais afiados, alisam a superfície usinada, ocasionando uma diminuição da rugosidade. Em decorrência disso, pode-se distinguir a faixa de aplicação dos abrasivos superduros, diamante ou de nitreto de boro cúbico. Superfícies com rugosidades iniciais inferiores a  $3\mu\text{m}$  apresentam uma taxa específica de brunimento maior se usinadas com abrasivos convencionais, em superfícies mais rugosas, o uso de grãos abrasivos mais duros é vantajoso [7].

#### **3.7.7. Qualidade Inicial da Peça**

Em qualquer processo de fabricação, encontramos maior ou menor facilidade de obtenção da qualidade desejada, dependendo do estado inicial da peça. Em processos de acabamento, como o brunimento, esta característica é fundamental.

Para a caracterização do resultado de trabalho como função dos erros da peça pré-usinada, deve-se considerar este resultado relacionado a duas variáveis: qualidade superficial obtida e erro de forma, geralmente cilindricidade e circularidade.

Quanto à qualidade superficial, os valores de rugosidade obtidos, para materiais duros, são menores que os observados em materiais dúcteis. A comparação entre o ferro fundido e aços mostra que, com o aumento da dureza da peça, a qualidade melhora. Isto se explica pela menor deformação plástica dos materiais mais duros na fenda de trabalho, ao passo que materiais dúcteis, propiciam um fechamento da porosidade da pedra de brunir, levando a uma piora da

rugosidade. Outra característica importante dos materiais convencionais duros que contribui para a melhor qualidade superficial é o desgaste abrasivo considerável que sofrem os gumes da pedra de brunir. Os grãos arredondados contribuem para um alisamento da superfície que está sendo usinada.

Com relação aos erros de forma, existe uma correlação entre os erros iniciais da pré-usinagem e os obtidos após algum tempo de brunimento. A correção destes erros como se observou anteriormente, depende principalmente das características da ferramenta. A rugosidade inicial também influi sobre este aspecto. Em geral maiores rugosidades da peça pré-usinada têm um efeito positivo sobre a correção dos erros de forma. Para uma rugosidade elevada teremos uma grande taxa de brunimento efetiva, decorrente da pressão mais elevada, condição necessária a uma maior correção dos erros de cilindricidade e circularidade.

Contudo, para se obter a correção do erro de forma da pré-usinagem, deve-se manter a rugosidade inicial em valores da mesma ordem de grandeza deste erro.

### **3.7.8. Fluidos de corte**

Todo processo de fabricação utiliza fluidos de corte com características físicas e químicas bem específicas. Para o brunimento, a composição e a viscosidade do fluido de corte são dependentes do material da peça e da ferramenta, além dos parâmetros de usinagem usados.

Em processo de retirada de cavaco, grande parte da energia associada é dissipada em forma de calor. No brunimento, em comparação com outros processos, é verificado um aquecimento relativamente pequeno na zona de contato, entre grãos abrasivos e a superfície da peça. Pois além da seção de cavacos se encontrar no campo micrométrico, a área de contato entre a pedra de brunir e a peça é relativamente grande. Nesta situação o fluido é muito importante na lubrificação e retirada de cavacos na zona de corte.

### **- Composição do fluido de corte para brunimento**

No brunimento são empregados fluidos que, segundo a definição da DIN 51385, estão divididos em fluidos de corte missíveis, ou não, em água. Como material básico são usados geralmente óleos de base parafínica, naftênica, ou suas misturas.

Para se alcançar os resultados desejados, no brunimento, é necessária a presença de uma série de aditivos, apropriados a cada caso. Estes aditivos, em geral, melhoram a capacidade de lubrificação do fluido, pois estimulam a formação de camadas protetoras sobre a superfície metálica exposta. Dentre eles, os mais usuais, para os fluidos não missíveis em água, são os ligantes orgânicos (ácidos graxos) e ligantes de cloro, fósforo ou enxofre. Para fluidos de corte missíveis em água são empregados aditivos emulsificadores, anticorrosivos e antiespumantes.

O filme de lubrificação na interface ferramenta-peça forma-se por intermédio da viscosidade e de aditivos do fluido. Dependendo do tipo de aditivos, eles podem formar camadas de absorção ou reagir quimicamente com a superfície metálica e por atração favorecer a deposição de outras camadas. A espessura deste filme diminui com o aumento da pressão de contato aumentando assim a taxa de remoção de material.

### **- Viscosidade do lubrificante**

A viscosidade de fluidos de corte não missíveis em água tem uma influência muito significativa no resultado do brunimento. Hoje em dia são empregados fluidos de corte com viscosidades preferencialmente no campo de 2 a 12 mm<sup>2</sup>/s (a 40°C), e 20 mm<sup>2</sup>/s em casos especiais. Para especificar um fluido de corte deve-se levar em consideração que materiais que geram cavacos curtos e duros (aços temperados, nitretados e cromados) são brunidos com óleos de baixa viscosidade, ao passo que para materiais que geram cavacos longos e tenazes empregam-se óleos de alta viscosidade. Assim, quão mais difícil é usinar o material, menos viscoso deve ser o óleo utilizado [45].



### **- Propriedades exigidas para um fluido de corte**

Um bom desempenho de um fluido de corte, no brunimento, requer propriedades como:

#### **► Capacidade de lavação**

Para se obter superfícies de alta qualidade, é imprescindível que cavacos e partículas que se desprenderam da pedra de brunir sejam rapidamente afastados da região de trabalho. Este procedimento acontece para se evitar riscos indesejados, ou até mesmo soldagem a frio de partículas na superfície.

Uma lavação eficaz é conseguida através do emprego de fluidos de corte de viscosidade baixa. O grau de viscosidade deste fluido não pode ser escolhido aleatoriamente, pois deve ser levada em consideração a influência do tipo de material usinado, na sua especificação. A capacidade de lavação é determinada por quatro fatores:

- viscosidade;
- vazão;
- pressão e
- capacidade de arraste [17;45].

#### **► Capacidade de refrigeração**

Para evitar desvios dimensionais devido ao aquecimento das peças, os fluidos de corte devem ter a característica de um bom efeito de refrigeração. Este efeito é dependente da capacidade térmica específica, da condutividade e do calor latente de vaporização do fluido.

Um bom refrigerante é a água que absorve e conduz melhor o calor do que óleo mineral. No entanto, a água possui uma insuficiente capacidade de lubrificação, além de causar corrosão em máquinas e peças. Devido a estes fatos, fluidos de corte de baixa viscosidade são empregados mais favoravelmente no brunimento. Deve-se observar que a temperatura de trabalho do fluido de corte deve estar situada próxima à temperatura ambiente local [17;45].

**► Capacidade de lubrificação**

A capacidade de lubrificação de um fluido de corte é determinada segundo sua composição e, acima de tudo, sua viscosidade. O atrito no processo é diminuído através da formação de um filme viscoso entre a peça e a ferramenta. Com isto, tem-se uma subsequente diminuição da taxa de remoção de material, dada pela diminuição da profundidade de corte.

### 3.8. SUPERFÍCIES GERADAS NO BRUNIMENTO

#### 3.8.1. Generalidades

A camada superficial de um corpo não apresenta as mesmas propriedades físico-químicas de suas camadas mais internas. Estas propriedades da superfície devem ser conhecidas para que se possa modificá-las de acordo com o processo de fabricação, variação de temperatura e meio de atuação. Para tanto, faz-se necessário uma análise dos desvios aleatórios surgidos da topografia da superfície, assim como a observação das alterações que ocorrem na estrutura e propriedade do material. O estudo e a compreensão de ambos os aspectos, textura e integridade, leva à fabricação de componentes seguros, de longa vida e com características adequadas à sua função.

#### 3.8.2. Superfícies de Deslizamento

As funções das superfícies técnicas são divididas segundo o tipo de solicitações mais frequentes. No primeiro têm-se as superfícies não solicitadas mecanicamente, as quais não exigem uma contra-superfície. No segundo, as superfícies solicitadas por tensões que estão paradas em relação à contra-superfície. O terceiro corresponde às solicitadas por atrito, que apresentam movimento relativo entre a superfície principal e o contra-corpo, sendo este o caso das superfícies de deslizamento, rolamento e frenagem.

As superfícies geradas no brunimento interagem em condições de atrito, caracterizando-se como superfícies de deslizamento lubrificadas (**SDL**). Uma **SDL** deve apresentar características como, precisão de forma, resistência ao desgaste, amortecimento ao desgaste inicial, além da capacidade de deslizar, suportar carga e reter o lubrificante. De tal modo que a solicitação específica sobre a mesma torne-se a menor possível [46].

### **3.8.3. Análise de uma superfície usinada**

Diante dos muitos métodos disponíveis para a medida das micro e macro características geométricas das superfícies os mais usados são os perfilômetros. Eles fornecem um comprimento representativo da superfície com uma boa aproximação de sua forma num plano normal a este comprimento. O método perfilométrico mais usado consiste em um apalpador de diamante ou cabeçote óptico que percorre a superfície descrevendo seu perfil. Este método apresenta erros e limitações, mas em problemas de engenharia sua utilização é amplamente aceita [47].

A tecnologia de superfície é a atividade que descreve, detalha e avalia a condição tanto de superfície (textura de superfície) como das camadas de superfície (integridade superficial) dos componentes fabricados. Com o intuito de avaliar a integridade superficial de uma peça, deve-se levar em consideração aspectos como microestrutura e tensões residuais, entre outros. Para avaliar as tensões residuais seriam empregadas, por exemplo, o método de remoção de camadas ou avaliação por difração de raios-x. Já para o estudo da microestrutura pode-se proceder uma análise metalográfica.

Embora a maioria das alterações ocorram nos centésimos de milímetros superficiais, esta profundidade pode tornar-se significativa para peças de paredes finas, pois muitas falhas originam-se nos primeiros milésimos de milímetros da superfície geométrica [41]. Como no brunimento tais problemas são praticamente inexistentes, pelas próprias características do processo, o estudo direciona-se à textura superficial.

### **3.8.4. Parâmetros empregados na caracterização superficial**

Diferentes parâmetros são empregados na caracterização de uma superfície e, devido as várias definições, resultam valores numéricos diferenciados. Assim não expressam exatamente as mesmas, mas frequentemente informações semelhantes.

Os parâmetros mais citados na literatura são enumerados a seguir :

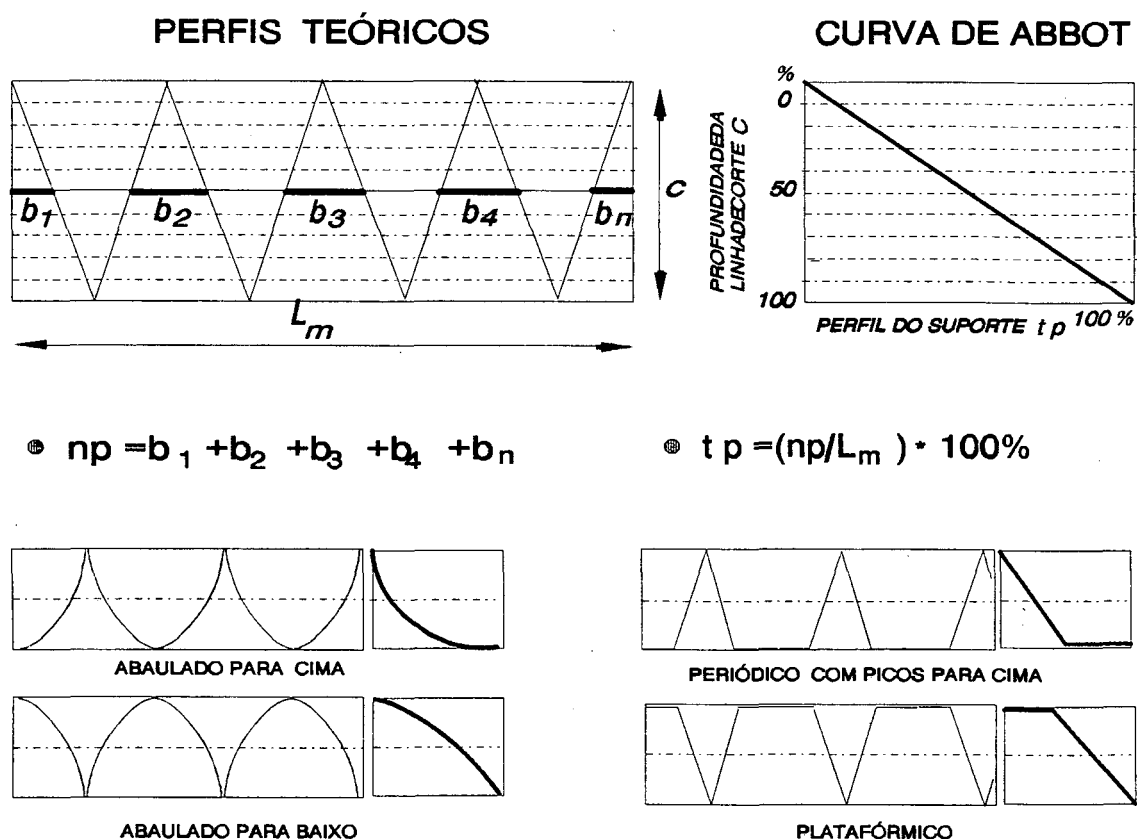
- **parâmetros verticais** - relativo às amplitudes dos desvios geométricos (  $R_a$ ,  $R_t$  e  $R_z$  ),
- **parâmetros horizontais** - relativo aos períodos dos desvios geométricos,
- **parâmetros de declive e ângulos** - relativo aos declives e ângulos ao longo do perfil,
- **parâmetros da forma do perfil** - relativo às formas e à evolução do perfil [46].

A adequação de uma superfície à sua função está intimamente ligada à sua topografia. A interpretação e caracterização desta superfície pode tornar-se difícil se for empregado um único parâmetro para esta avaliação. Já a combinação de parâmetros pode facilitar a tarefa, contudo nem sempre se obtém o melhor resultado. O problema acontece devido ao fato de que superfícies obtidas por diferentes processos de fabricação podem apresentar parâmetros superficiais de mesma ordem de grandeza, no entanto os seus perfis podem ser completamente diferentes. Uma forma mais eficiente de proceder esta análise é a utilização de um método como a Curva de Abbot, que fornece informações relativas ao perfil gerado. Assim, a avaliação da superfície em relação a sua rugosidade e forma do perfil leva à avaliação e utilização correta do elemento.

### 3.8.5. Curva de Abbot

Este método, para a análise do perfil de superfícies, foi desenvolvido por Abbot e Firestone, pesquisadores da perfilometria [48]. Com a Curva de Abbot é possível analisar graficamente a relação entre o percentual do perfil de suporte ( $t_p$ ) e a profundidade da linha de corte ( $i_c$ ), o que caracteriza o perfil de suporte da superfície. Estatisticamente o método é conhecido como a função de distribuição acumulada [46].

A figura 3.53 mostra as Curvas de Abbot obtidas para diferentes perfis superficiais teóricos. Dentre estes, o perfil platafórmico é o que melhor fornece as características requeridas de uma **SDL**.



**Figura 3.53 - Perfis teóricos e sua Curvas de Abbot**

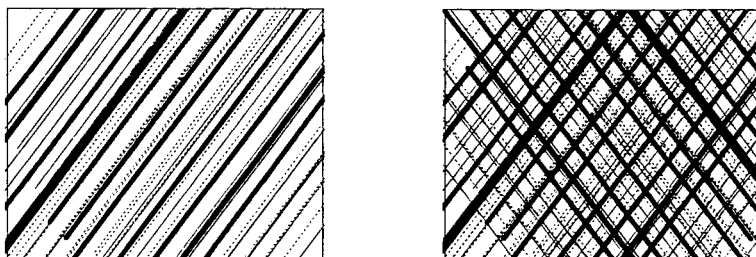
### 3.8.6. Superfícies Brunidas

O brunimento proporciona uma topografia de boa qualidade, onde se obtém uma pequena rugosidade, além de bom contacto entre as partes com excelente comportamento de desgaste e boa redução no nível de ruídos. No brunimento, também pela baixa geração de calor, não ocorre oxidação e nem alteração da estrutura cristalina [42].

Em grande parte dos casos, a cinemática de brunimento proporciona uma superfície com estrias cruzadas que apresentam, em geral, um ângulo de cruzamento de  $45^\circ$  a  $60^\circ$ , faixa esta baseada em pesquisas empíricas as quais mostraram que o consumo de óleo depende deste ângulo, figura 3.54 à direita. Ângulos  $\alpha$  pequenos são apropriados para superfície de deslizamento

a seco, e a grandes são associados a um elevado consumo de óleo [21].

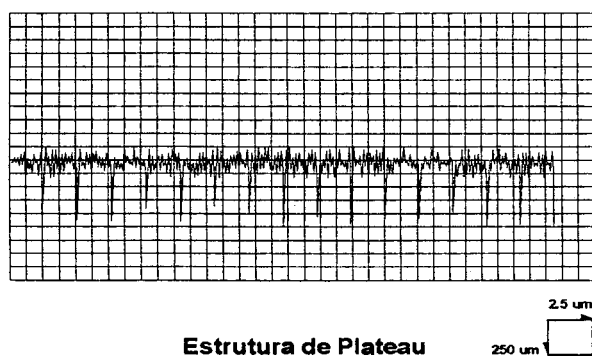
Existem também outras superfícies onde o ângulo de cruzamento não é tão visível. São as superfícies obtidas através do brunimento "Precidor", figura 3.54 à esquerda



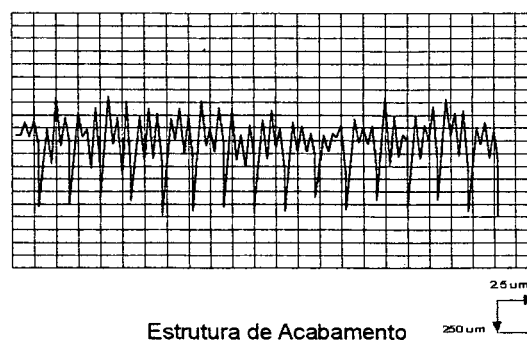
**Figura 3.54-** Estrutura do brunimento precidor e convencional

### 3.8.7. Brunimento de "Plateau"

Com esta estratégia de brunimento objetiva-se desenvolver uma estrutura específica, a qual apresenta um perfil periódico com grandes áreas planas separadas por sulcos, figura 3.55. O perfil gerado neste processo diferencia-se do obtido no brunimento de acabamento, figura 3.56, principalmente por melhores características de resistência ao desgaste e retenção de óleo.



**Figura 3.55 -** Brunimento de "Plateau"



**Figura 3.56 -** Brunimento de acabamento

A estrutura platafórmica é obtida em três etapas: brunimento de desbaste, "plateau" de base e "plateau" de acabamento.

No desbaste elimina-se as heterogeneidades geradas no processo de fabricação anterior. A ferramenta de desbaste deve possuir a capacidade tanto de alisar quanto de aumentar a rugosidade da superfície. Nesta etapa, utiliza-se uma granulometria grosseira promovendo a formação dos sulcos profundos que devem estar presentes nas superfícies do perfil platafórmico.

No brunimento de plateau de base ocorre uma rápida remoção dos picos aleatórios, com uma ferramenta de granulometria menor, formando os pequenos plateaus. A estrutura platafórmica possui grande área de apoio e baixa rugosidade.

Finalmente, no brunimento de acabamento, objetiva-se uma redução da rugosidade dos plateaus, gerados na fase anterior, o que resulta numa melhora das características necessárias para uma superfície de deslizamento. A ferramenta, neste caso, possui granulometria mais fina.

Somente com o emprego de superfícies platafórmicas, tem-se um comportamento de desgaste favorável para atender, por exemplo, às exigências feitas às camisas de pistões de motores diesel de alta compressão e de outros elementos que atuem sob condições de atrito [49].

Neste capítulo foi abordada a conceituação básica sobre os diversos processos de brunimento. Procurou-se dar ênfase ao brunimento de curso longo, apresentando-se as suas particularidades e os resultados obtidos com este processo, frente às diferentes variáveis de entrada envolvidas. No capítulo seguinte será apresentado o planejamento dos experimentos realizados.



# CAPÍTULO 4

## PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como foi relatado, já na introdução deste trabalho, a pesquisa aqui apresentada é fruto do convênio de cooperação LMP - EMBRACO. A princípio, ambas as partes desejavam conhecer mais sobre as implicações tecnológicas do brunimento, para uma futura otimização do processo de fabricação do bloco do compressor EM. Contudo, sabe-se das dificuldades e dos problemas que implicam da parada de uma linha produtiva bastante elevada, como ocorre na fabricação do bloco EM. Devido a este fator, os estudos que deveriam ser realizado na brunidora da linha "transfer", foram procedidos em uma brunidora vertical de três eixos, utilizando como corpos de prova, blocos do compressor rotativo. Isto não implicou maiores problemas, já que, na fase inicial da pesquisa, desejava-se conhecer o comportamento característico do processo de brunimento "Precidor", em relação às forças envolvidas. Comportamento que teoricamente é o mesmo para ambas as peças, excetuando-se o nível de grandeza dos esforços relacionados à diferença de diâmetros. Na fase posterior pretendia-se estudar as grandezas de influência sobre o processo e, então de posse de resultados concretos buscar a melhoria das condições de trabalho.

Como nas duas etapas, um número pequeno de peças e um reduzido tempo estavam envolvidos, procurou-se aplicar métodos de análise que permitissem um estudo um tanto mais rápido, aliado à confiabilidade nos resultados obtidos.

Para tanto, optou-se pelo emprego da Análise de Variância, sendo que os ensaios de força foram executados por experimentos fatoriais saturados e os ensaios das grandezas influentes no processo, por experimentos fatoriais fracionários. Nestes últimos aliaram-se as Técnicas de Taguchi, metodologias que serão brevemente descritas a seguir.

## 4.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.2.1. Análise de Variância

A análise de variância é uma ferramenta muito útil para que se possa tomar uma decisão, quanto à influência de determinado fator sobre o resultado, sem que seja necessário o julgamento subjetivo de quem está fazendo a análise. Este método será empregado para analisar a influência da sobremedida de material e do desvio de forma inicial da peça, sobre as forças geradas no processo de brunimento.

Neste caso, onde se deseja conhecer o comportamento de um elemento em relação a dois fatores, o modelo utilizado para a análise deve ser:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1,2,\dots,a; \\ j=1,2,\dots,b; \\ k=1,2,\dots,n \end{array} \right.$$

onde,

$y_{ijk}$  - resposta correspondente a  $k$  - ésima unidade que recebe o tratamento consistente na combinação do nível  $i$  de A com o nível  $j$  de B;

$\mu$  - média geral ;

$\tau_i$  - efeito do nível  $i$  de A;

$\beta_j$  - efeito do nível  $j$  de B;

$(\tau\beta)_{ij}$  - efeito da combinação do nível  $i$  de A com o nível  $j$  de B;

$\varepsilon_{ijk}$  - erro aleatório.

Com relação aos parâmetros  $\tau_i$  e  $\beta_j$ , se os tratamentos são fixados previamente pelo experimentador, os resultados obtidos são válidos apenas para o conjunto de tratamentos usados

e o modelo empregado é de efeitos fixos. Entretanto, quando os tratamentos são uma amostra aleatória de uma população de tratamentos, emprega-se um modelo de efeitos aleatórios. Nesta análise foi empregado o modelo de efeitos fixos, uma vez que os fatores foram fixados previamente [50].

No modelo de efeitos fixos, os efeitos  $\tau_i$  e  $\beta_j$  são usualmente definidos como desvios da média global, de modo que

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (4.3.1)$$

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \quad (4.3.2)$$

Se a hipótese  $H_0$  for verdadeira, todos os tratamentos terão média  $\mu$  iguais. Então, para o efeito do tratamento A:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = 0;$$

$$H_1: \text{pelo menos um } \tau_i \neq 0.$$

Para o efeito do tratamento B:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0;$$

$$H_1: \text{pelos menos um } \beta_j \neq 0.$$

E para o efeito dos tratamentos A e B:

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ para todo } i,j;$$

$$H_1: \text{pelo menos um } (\tau\beta)_{ij} \neq 0.$$

O procedimento para testar a igualdade das médias dos tratamentos, ou testar se os efeitos dos tratamentos são iguais a zero, é a análise da variância, onde a hipótese  $H_0$  é chamada de hipótese nula e  $H_1$ , hipótese alternativa.

Para testar  $H_0$  é necessário fixar o valor da probabilidade de se rejeitar esta hipótese quando ela for verdadeira. Este valor é denotado por  $\alpha$  e deve ser pequeno, uma vez que a

rejeição da hipótese  $H_0$  quando ela for verdadeira é um erro, denominado de erro tipo I.

Para  $\alpha$  fixado, determina-se na tabela referente à distribuição F, o valor correspondente a  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ . Se o valor de  $F_0$  encontrado experimentalmente for maior que  $F_{\alpha, n1-1, n2-1}$ ,  $H_0$  é rejeitada e os tratamentos apresentam diferenças significativas entre seus efeitos, sendo estes diferentes de zero. Para dois fatores,  $F_0$  é calculado como mostra a tabela 4.1.

**Tabela 4.1-** Análise de variância

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	$F_0$
Tratamento A	a-1	SSA	$MS_A$	$MS_A/MS_e$
Tratamento B	b-1	SSB	$MS_B$	$MS_B/MS_e$
Interação	(a-1).(b-1)	SSAB	$MS_{AB}$	$MS_{AB}/MS_e$
Erro	ab(n-1)	$SS_e$	$MS_e$	
Total	abn-1	$SS_T$		

As somas dos quadrados são calculadas como:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}; \quad (4.3.3)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn}; \quad (4.3.4)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B; \quad (4.3.5)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad e \quad (4.3.6)$$

$$SS_e = SS_T - SS_{AB} - SS_A - SS_B. \quad (4.3.7)$$

#### 4.2.2. Técnicas de Taguchi para Análise de Resultados

Os processos produtivos envolvem, normalmente, um grande número de variáveis e um tempo reduzido para a solução dos seus problemas. Por isto, muitas vezes, torna-se impraticável a análise destes processos com o uso da experimentação clássica. Para contornar esta situação, foram desenvolvidos alguns outros métodos que se utilizam da experimentação fatorial fracionária na análise de resultados, como é o caso das técnicas de Taguchi.

As técnicas de Taguchi, desenvolvidas no sentido de reduzir o nível de variação de produtos e processos, envolvem toda uma conceituação estatística que permite analisar e interpretar o comportamento de dados representantes de uma população. Neste aspecto, pode-se estudar os diferentes **fatores** (variáveis de entrada) que influenciam o resultado final de um processo ou produto, observando-se o grau de influência exercido por cada fator ou pela interação entre dois ou mais deles.

A estruturação dos ensaios é feita a partir da seleção dos fatores que influem sobre determinado produto, em geral este estudo pode ser feito com o uso de um diagrama **causa-efeito**. O passo seguinte é a determinação do número de **níveis** que cada fator deve possuir, inicialmente é recomendado o estudo com poucos níveis, o que reduz o número de ensaios necessários. Após a identificação dos fatores mais importantes, um estudo mais aprofundado e com um maior número de níveis pode ser efetuado.

Os dois primeiros passos fornecem insumos para a seleção da **matriz ortogonal** a ser utilizada nos ensaios. Estas matrizes usam apenas uma parte de todas as combinações possíveis, para estimar os efeitos gerados pelos diferentes fatores, o que caracteriza o experimento fracionário. A interpretação dos resultados é obtida mediante a análise da variância dos fatores em seus diferenciados níveis, e o grau de influência de cada um deles sobre o processo pode ser expresso em gráficos que demonstram esta relação.

Esta breve conceituação torna-se mais clara ao longo deste capítulo, onde cada passo da metodologia é descrito, na execução do planejamento dos experimentos.

### **4.3. SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA**

#### **4.3.1. Variáveis Envolvidas no Ensaio de Força**

No ensaio de força pretende-se encontrar o comportamento característico do brunimento, ao longo do tempo de usinagem, identificando-se as várias etapas do processo. Nestes experimentos procura-se estabelecer a relação entre os esforços envolvidos durante a usinagem, com a remoção de material e, a provável relação destas mesmas forças com a característica de forma inicial das peças. Para isto, as variáveis necessárias no levantamento experimental são as seguintes:

**• Variáveis de entrada :**

- Desvio de forma inicial (mm);
- Sobremedida de material (mm ) e
- Granulometria da ferramenta ( $\mu\text{m}$  ).

**• Variáveis de saída :**

- Força de Avanço (N) e
- Momento Torçor (Ncm).

A rotação, o avanço e o curso da ferramenta são mantidos constantes ao longo dos experimentos.

#### **4.3.2. Variáveis Envolvidas no Estudo dos Resultados do Trabalho**

Os ensaios para estudar os resultados do trabalho, no brunimento "Precidor", são experimentos preliminares. Não se busca a otimização do processo já nesta fase inicial dos trabalhos, mas sim a identificação de quais os pontos que primeiramente devem ser atacados, para que nos trabalhos que venham dar continuidade à esta pesquisa, se possa chegar a conclusões mais específicas. Contudo, pretende-se investigar o comportamento do processo de brunimento, correlacionado às seguintes variáveis :

• **Variáveis de entrada :**

- Cilindricidade inicial (mm);
- Sobremedida de material (mm);
- Curso da ferramenta (mm);
- Rugosidade inicial  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ );
- Rotação da ferramenta (RPM) e
- Avanço da ferramenta (mm/min).

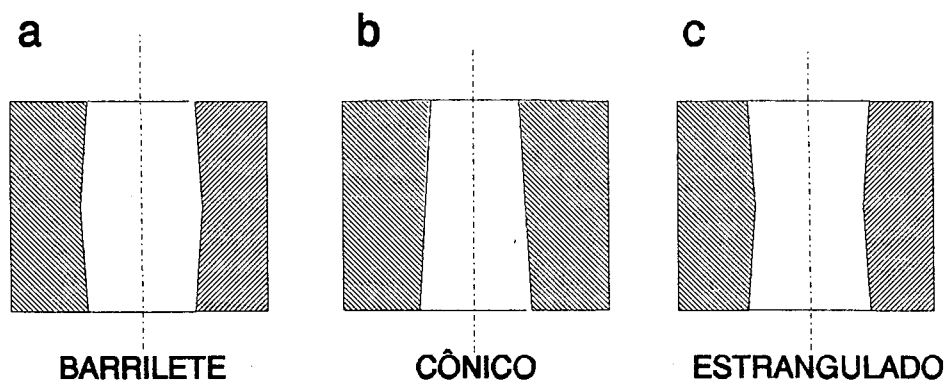
• **Variáveis de saída :**

- Circularidade final (mm);
- Cilindricidade final (mm);
- Remoção (mm) e
- Rugosidade final  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ).

#### 4.4 . DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

##### 4.4.1. Níveis das Variáveis no Ensaio de Força

- **Cilindricidade** : os desvios de forma analisados neste estudo são identificados de acordo com três formas básicas de perfil, o desvio de forma do tipo **a** é classificado como barrilete, o do tipo **b** como cônico e , finalmente, o do tipo **c** como estrangulado. Estas três formas básicas são mostradas na figura 4.1.



**Figura 4.1** - Desvio de forma inicial das peças

- **Ferramentas** : são avaliadas duas ferramentas que diferem somente pela granulometria do abrasivo empregado:

- Ferramenta 1 : D/50/W/570/100;

- Ferramenta 2 : D150/W/570/100.

- **Sobremedida** : a remoção de material é feita de maneira a cobrir todo o campo de atuação das duas ferramentas de brunimento estudadas. De maneira que seja alcançada a máxima remoção de material, possível, com cada uma das ferramentas. Em geral, a penetração dos gumes de geometria não definida, o que implica na sobremedida de material , varia de 10 até 25% do tamanho médio do grão ( $D_{méd}$  ). O que pode ser representado pela expressão,

$$S_{máx} = \frac{[D_{méd}]}{4}$$

assumindo-se que os grão atinjam a penetração máxima, para as diferentes granulometrias de ferramenta, tem-se as seguintes sobremedidas máximas:

$$S_{máx} \text{ D50} = 13.5 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{e} \quad S_{máx} \text{ D150} = 37.5 \text{ } \mu\text{m}$$

- **Rotação, avanço e curso** : estes parâmetros de corte são repectivamente 239 RPM (12 m/min), 0.8 m/min e 185 mm.

#### 4.4.3. Níveis das variáveis no ensaio dos resultados do trabalho

Os resultados do processo de brunimento são investigados, neste trabalho, por técnicas Taguchi, sendo que a influência gerada por cada variável ( fator ) é analisada em apenas dois níveis, os quais são designados como baixo (1) e alto (2). Duas etapas de ensaios são executadas, na primeira busca-se a otimização de determinados parâmetros, visando-se a identificação e



otimização dos fatores restantes, na segunda fase.

- **Cilindricidade** : a cilindricidade das peças é analisada, nos seguintes campos:

**Baixa:**

de 0.000 a 0.011mm,

**Alta:**

de 0.012 a 0.024 mm.

- **Sobremedida** : como na análise dos resultados em função das variáveis de entrada, objetiva-se conhecer a influência qualitativa da remoção. Os níveis de sobremedida são considerados em relação ao diâmetro que as peças deveriam possuir após o brunimento, e não mais em relação à penetração máxima dos gumes. Então para um diâmetro nominal do furo de 17.995mm, tem-se diâmetros de entrada variando de 17.932 a 17.963mm. Ocasionalmente os grupos de sobremedidas que seguem:

**Baixa:**

de 0.032 a 0.048 mm,

**Alta:**

de 0.048 a 0.063 mm.

- **Curso da ferramenta** : os cursos estabelecidos estão vinculados ao deslocamento da região de corte da ferramenta, em relação à posição inferior do furo brunido. No curso baixo a região de corte ultrapassa o furo em 9 mm e, no curso alto em 24 mm, que equivalem a 11 e a 30% da região com 80 mm de comprimento. Os cursos são respectivamente:

**Baixo:**

159 mm,

**Alto:**

174 mm.

- **Rugosidade inicial** : a rugosidade também é definida dentro de uma faixa que corresponde aos seguintes níveis :

**Baixo:**

de 2.24 a 3.24  $\mu\text{m}$ ,

**Alto:**

de 3.24 a 4.13  $\mu\text{m}$ .

- **Rotação da ferramenta** : as referências bibliográficas situam as velocidades de corte no brunimento "Precidor", numa faixa que se apresenta de 10 a 20 m/min [28], o que para um diâmetro de 18 mm resulta num campo de rotações variando de 177 a 354 RPM. Como a limitação da máquina impõe uma rotação máxima de 250 RPM, as rotações escolhidas foram:

**Baixa:**

150 RPM,

**Alta:**

250 RPM.

- **Avanço da ferramenta**: conforme as referências bibliográficas [28;51], o avanço deve situar-se entre 1 e 2 m/min. Como a limitação da máquina possibilita um avanço máximo de 1.8 m/min, os avanços selecionados foram:

**Baixo:**

0.8 m/min,

**Alto:**

1.8 m/min.

#### 4.5. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ ORTOGONAL

A escolha da matriz ortogonal é decorrente do número de graus de liberdade do conjunto de dados, o que reflete o número total de experimentos a serem conduzidos. Portanto, com base nos fatores (variáveis de entrada) e nos graus de liberdade associados a eles, pode-se determinar a matriz ortogonal mais adequada ao procedimento.

A tabela 4.2 mostra os fatores influentes no processo e seus respectivos níveis, as prováveis interações existentes e os graus de liberdade relacionados aos fatores e interações.

**Tabela 4.2 - Dados para obtenção da matriz ortogonal**

Fatores	Níveis		Interações	Hipóteses de influência :
A - Conicidade	-	0.000 - 0.011 mm	A x B	Na forma e rugosidade
	+	0.012 - 0.024 mm	A x C	Na forma e rugosidade
B- Sobremedida	-	0.032 - 0.048 mm	B x C	Na forma
	+	0.048 - 0.063 mm	D x E	Na forma e rugosidade
C- Curso	-	159 mm	Graus de liberdade relacionados a:	
	+	174 mm		
D - Avanço	-	0.8 m/min	média dos dados	1
	+	1.8 m/min	Fat. A,B,C,D,E,F	$N^{\circ} \text{ Fat} \times (N^{\circ} \text{ niv} - 1) = 6$
E - Rotação	-	150 RPM	Int. ( A x B )	$(N^{\circ} \text{ niv}_A - 1) - (N^{\circ} \text{ niv}_B - 1) = 1$
	+	250 RPM	Int. ( A x C )	$(N^{\circ} \text{ niv}_A - 1) - (N^{\circ} \text{ niv}_C - 1) = 1$
F - Rugosidade	-	2.24 - 3.24 $\mu\text{m}$	Int. ( B x C )	$(N^{\circ} \text{ niv}_B - 1) - (N^{\circ} \text{ niv}_C - 1) = 1$
	+	3.24 - 4.13 $\mu\text{m}$	Int. ( D x E )	$(N^{\circ} \text{ niv}_D - 1) - (N^{\circ} \text{ niv}_E - 1) = 1$

Observa-se um total de 11 graus de liberdade, o que conduz para a utilização de uma matriz L12. Esta matriz comportaria os 11 experimentos necessários neste caso, porém, a influência das interações pode ser confundida, já que o arranjo L12 deve ser usado preferencialmente para estimar efeitos principais [52]. Portanto, optou-se pelo emprego de uma matriz L16, que pode ser observada juntamente com seu gráfico linear no anexo A .

## 4.6. INFRAESTRUTURA DA EXPERIMENTAÇÃO

### 4.6.1. Máquina-Ferramenta

O brunimento das peças empregadas nos ensaios foi desenvolvido em uma máquina de brunir Nagel, modelo 4V-500. Esta máquina caracteriza-se por possuir três eixos de acionamento aos quais são acopladas ferramentas com diferente granulometria. Tal configuração possibilita o brunimento em múltiplos estágios, sendo possível desenvolver o desbaste, o semi-acabamento e o acabamento das peças. No entanto, durante os experimentos, dois dos eixos foram bloqueados e o trabalho reduziu-se a fase de desbaste.

Como característica a ser salientada está o acionamento hidráulico da rotação e do avanço desta máquina.

### 4.6.2. Ferramentas

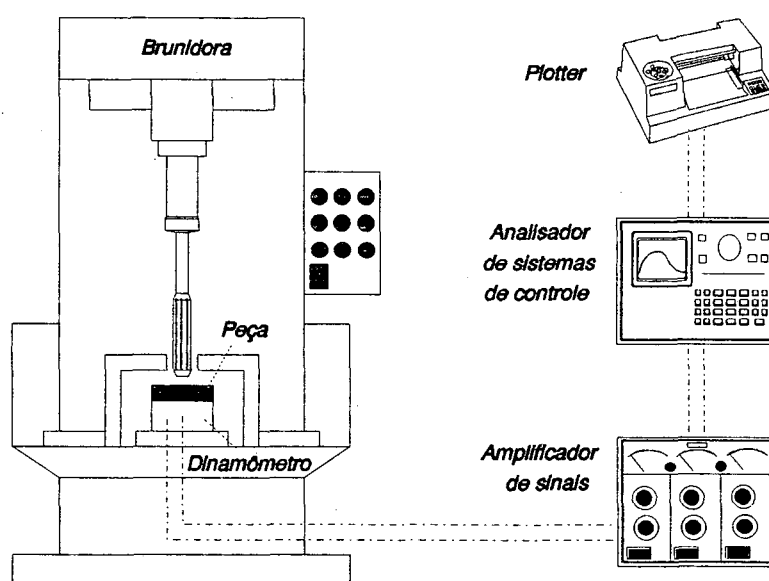
Todas as ferramentas usadas nos ensaios são do tipo "Precidor". Estas diferenciam-se basicamente pelo diâmetro e granulometria do abrasivo, de acordo com a aplicação no estudo. Os dados relacionados à especificação da ferramenta são apresentadas na tabela 4.3, Já o desenho e a forma construtiva de uma ferramenta "Precidor" foram vistos anteriormente na figura 3.24, item 3.6.1.

**Tabela 4.3 - Especificação das ferramentas dos ensaios.**

Ensaio	Descrição	Granulometria do Diamante ( $\mu\text{m}$ )	Ligante	Dimensões	Fabricante
Força	D50/W/570/100	50 - 63	Bronze B570	$\phi$ 16 mm Régua 4 x 80 mm	NAGEL
	D150/W/570/100	150 - 180			
Resultados do Trabalho	D150/W/570/100	150 - 180	Bronze B570	$\phi$ 18 mm Régua 4 x 80 mm	

#### 4.6.3. Sistema de medição de forças

O sistema de medição de forças constitui-se basicamente de um dinamômetro piezelétrico, um amplificador de sinais, uma unidade de sistema de controle para o tratamento dos dados e um plotter para apresentação dos gráficos da força de avanço e do momento torçor. A montagem do conjunto é mostrada na figura 4.2, a especificação dos equipamentos está no anexo B.



**Figura 4.2** - Montagem do sistema de medição de forças

#### 4.6.4. Equipamentos auxiliares

Para a estruturação dos ensaios se faz necessário o uso de equipamentos auxiliares para verificação de dimensões e qualidade superficial dos corpos de prova, e determinação de algumas das variáveis de entrada do processo.

- **Máquina de medir por coordenadas** : a máquina UPMC 550 da marca ZEISS, foi empregada na determinação dos diâmetros dos corpos de prova usados nos ensaios.

- **Medidor pneumático de diâmetros**: este aparelho, do tipo coluna pneumática (FEINPRÜFF), foi empregado na seleção e classificação das peças de produção, devido a inviabilidade de executar esta tarefa com o equipamento anterior.

- **Circularímetro** : o equipamento, da marca RHT, foi utilizado na determinação dos desvios de circularidade e cilindridade, dos corpos de prova.

- **Rugosímetro** : um rugosímetro Talysurf foi utilizado para verificar a qualidade superficial dos corpos de prova da segunda etapa de ensaios, antes e depois dos experimentos.

- **Tacômetro** : este instrumento foi aplicado na verificação do campo de rotações da máquina de brunir. A especificação dos equipamentos está no anexo B.

#### 4.6.5. Corpos de Prova

Os ensaios foram executados utilizando-se peças de produção na avaliação experimental. No levantamento das forças do processo empregou-se blocos do compressor rotativo, já na análise dos resultados em função das grandezas de entrada, os corpos de prova foram blocos do compressor EM, ambos produzidos pela Empresa Brasileira de Compressores (EMBRACO).

O material dos corpos de prova é ferro fundido GG20, cuja as principais propriedades mecânicas são descritas abaixo [52]:

- Resistência à tração :  $155 \text{ N/mm}^2$  ;
- Resistência à compressão :  $584 \text{ N/mm}^2$  ;
- Resistência ao cisalhamento:  $183 \text{ N/mm}^2$  e
- Dureza Brinel: 130 - 180 HB

•TC: 3.10 - 3.30

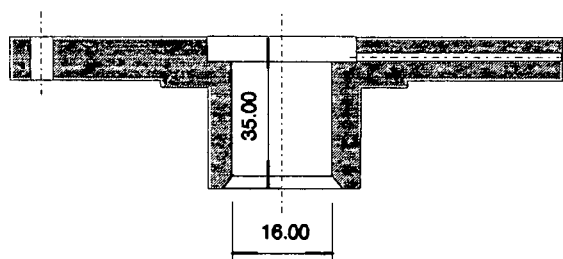
•Si : 3.20 - 3.40

- Composição química %    •S : 0.08 - 0.13

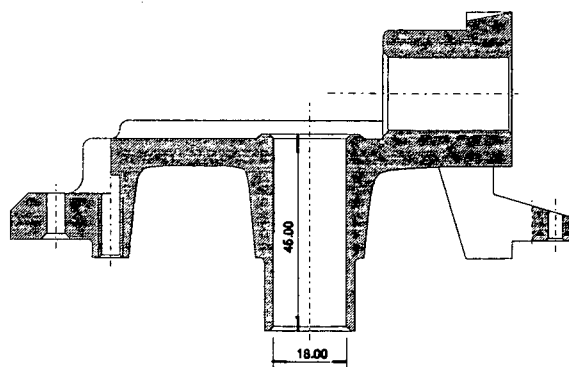
•P : 0.20 - 0.40

•Mn: 0.50 - 0.80

As principais dimensões, dos blocos do compressor Rotativo e do compressor EM, associadas ao contexto deste estudo são apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4.



**Figura 4.3** - Croquis do bloco rotativo



**Figura 4.4** - Croquis do bloco EM

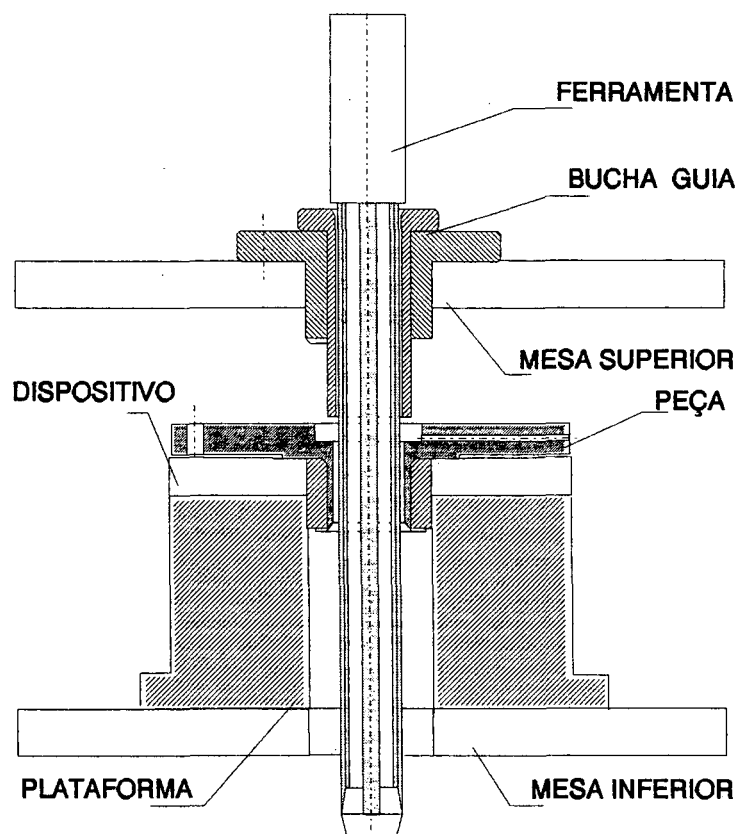
#### 4.6.6. Dispositivos de Fixação

Como a geometria das peças difere, foi necessária a fabricação de dois dispositivos de fixação, diferenciados. Contudo, procurou-se que em ambas as formas construtivas, o dispositivo possibilitasse condições de fixação similares às apresentadas durante a produção.

Os projetos foram relativamente simples, já que os dispositivos deveriam impedir somente o giro das peças, com uma folga relativamente grande. Simplificando, os dispositivos são placas com furos centrais e pinos de guia, para o posicionamento das peças.

O dispositivo para a usinagem dos ensaios de força apresenta uma geometria um tanto mais complexa devido a necessidade de fixação, do mesmo, na plataforma piezelétrica. Este dispositivo possui um rasgo central, para facilitar o posicionamento da peça durante o experimento. O rasgo se fez necessário devido ao pequeno espaço existente entre as mesas de fixação, superior e inferior, da máquina de brunir.

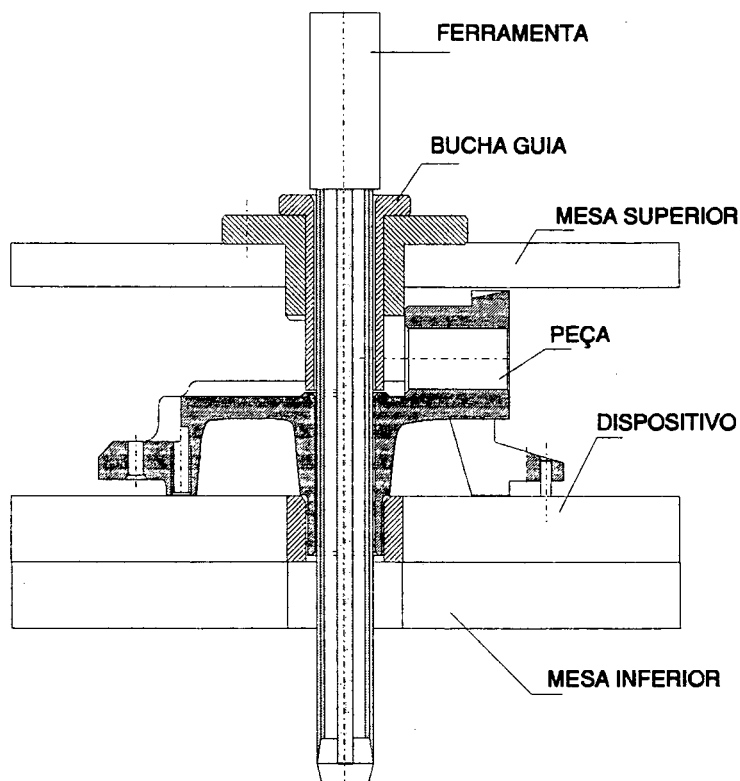
A figura 4.5 mostra a montagem do dispositivo de fixação do bloco do compressor Rotativo à plataforma piezelétrica.



**Figura 4.5** - Dispositivo de fixação do bloco Rotativo



A figura 4.6 mostra a montagem do dispositivo no ensaio com o bloco EM.



**Figura 4.6** - Dispositivos de fixação do bloco EM

Neste capítulo foi apresentado o planejamento dos experimentos a serem executados. A elaboração e montagem dos ensaios foi estruturada na análise de variância dos dados e nos métodos Taguchi para experimentação. No capítulo posterior será enfocada a análise dos resultados obtidos para as forças de usinagem no processo de brunimento.

## **CAPÍTULO 5**

### **FORÇAS DE BRUNIMENTO**

#### **VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS**

##### **5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A estudo de forças no brunimento é um tanto recente e existem poucas informações referentes aos fatores que afetam seu comportamento ao longo do processo, às influências que estas podem gerar nos resultados do trabalho e à sua interligação com as demais grandezas de entrada. No entanto, quer relacionadas à sobremedida, à granulometria da ferramenta ou a outros fatores, as forças são fundamentais para a caracterização do processo.

##### **5.2. METODOLOGIA DO ENSAIO**

O objetivo deste estudo é conhecer o comportamento da força de avanço  $F_f$  e do momento torçor  $M_t$ , bem como a ordem de grandeza destes esforços, para caracterizar as diversas etapas do brunimento "Precidor". A análise deste comportamento é feita em relação à sobremedida de material a usinar e ao desvio inicial de forma da peça.

###### **5.2.1. Desenvolvimento do Experimento**

A execução dos ensaios foi realizada utilizando-se como corpos de prova, os blocos do compressor Rotativo e as grandezas de entrada empregadas pela EMBRACO, de maneira que as únicas variáveis do processo são a sobremedida de material e a forma do furo.

Os corpos de prova foram posicionados no dispositivo de fixação, sobre a plataforma

piezelétrica, o qual impede seu movimento de giro, porém permite um pequeno deslocamento no sentido axial e radial, devido à folga necessária para o ajuste do furo com a ferramenta.

Durante o brunimento das peças, os valores de  $F_f$  e  $M_t$  foram obtidos mediante utilização do analisador de sistemas de controle, podendo-se verificar o pico e a média das forças em um intervalo de tempo pré-estabelecido. Após o brunimento as peças foram novamente medidas.

### - Seleção e classificação dos corpos de prova

Inicialmente todas as peças fornecidas para o ensaio foram medidas e marcadas de maneira que se pudesse separá-las em grupos, de acordo com os seus diâmetros médios. A medição destes diâmetros foi feita em três posições, através de um sistema pneumático. A figura 5.1 mostra o esquema do sistema de medição.

Após medidas, as peças foram classificadas de acordo com a faixa de sobremedida de material a remover e com o perfil do furo. O que gerou um arquivo com três famílias de peças com características semelhantes, ou seja mesmo diâmetro médio e um desvio de forma com característica de barrilete, cônico ou estrangulado.

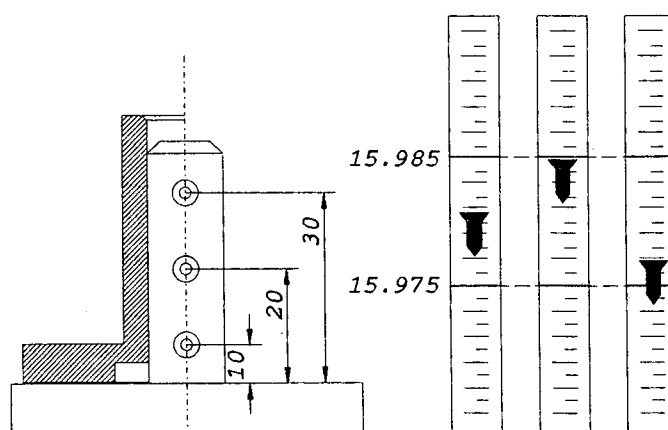


Figura 5.1 - Esquema do medidor pneumático

### - Determinação do diâmetro da ferramenta

O diâmetro da ferramenta de brunir não pode ser medido com instrumentos convencionais de medição, devido à sua irregularidade superficial, o que faz necessário o uso de uma metodologia alternativa para sua determinação.

Tal metodologia consiste na obtenção do diâmetro da ferramenta de forma indireta, ou seja, uma peça é brunida e sua dimensão determinada; em seguida aumenta-se o diâmetro da ferramenta até que esta passe através da peça com um leve esforço manual. O diâmetro da peça é novamente medido e esta dimensão é adotada como referência.

Deve-se ter em consideração que este diâmetro pode apresentar variações, já que é regulado para uma determinada condição de sobremedida e força normal  $F_p$ , as quais podem mudar ao longo do brunimento. Isto ocorre porque a ferramenta é um sistema elástico e existem deformações e folgas entre os seus elementos de transmissão, bem como nas pedras de brunir.

Assim, para um deslocamento radial nominal  $\Delta r_{(n)}$  da pedra de brunir, existe um deslocamento radial real  $\Delta r_{(r)}$ , o qual está diretamente relacionado à  $F_p$ , figura 5.2 [16].

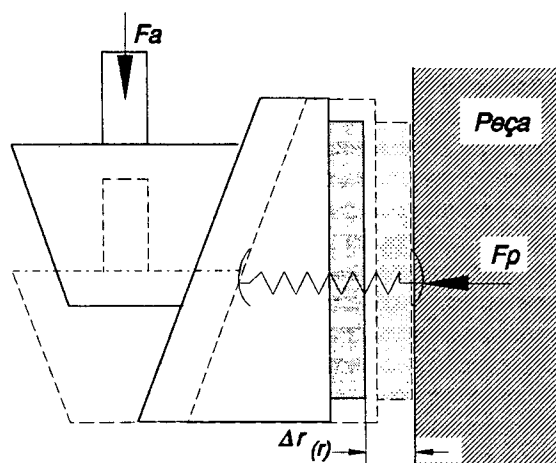


Figura 5.2 - Deformação da ferramenta durante o brunimento

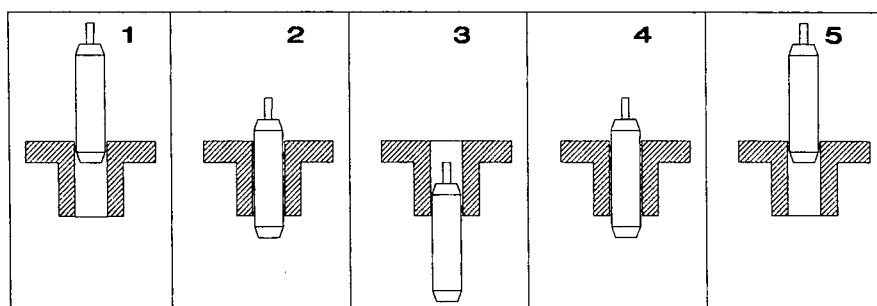
### - Operação do sistema de medição de forças

Para o levantamento das curvas de forças foi desenvolvido, no módulo de programação do analisador de sistemas de controle, um programa específico para o ensaio. Este programa permite, como já foi mencionado, a leitura direta dos picos e médias tanto da força de avanço  $F_f$ , quanto do momento torçor  $M_t$ . Neste procedimento de ensaio, estabeleceu-se uma faixa para análise dos valores equivalentes a dois segundos, a qual, de acordo com a possibilidade do equipamento, pode ser deslocada para qualquer posição da curva gerada. Como o analisador de sistemas de controle não permite armazenar os dados gerados durante os ensaios, foi necessário construir uma planilha para este fim. Porém, foram impressos alguns dos gráficos, registrando-se assim, não só a magnitude dos esforços, mas o seu comportamento ao longo do tempo de brunimento.

## 5.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FORÇA

### 5.3.1. Comportamento Característico da $F_f$ e do $M_t$ no Brunimento

De forma generalizada, o comportamento das curvas de força de avanço e de momento torçor pode ser associado ao deslocamento da ferramenta de brunimento em relação à peça, como se observa na figura 5.3.



**Figura 5.3** - Deslocamento da ferramenta em relação à peça

As figuras 5.4 e 5.5 mostram o comportamento característico da força de avanço  $F_f$  e do momento torçor  $M_t$ , no brunimento com ferramentas "Precidor" D50 e D150.

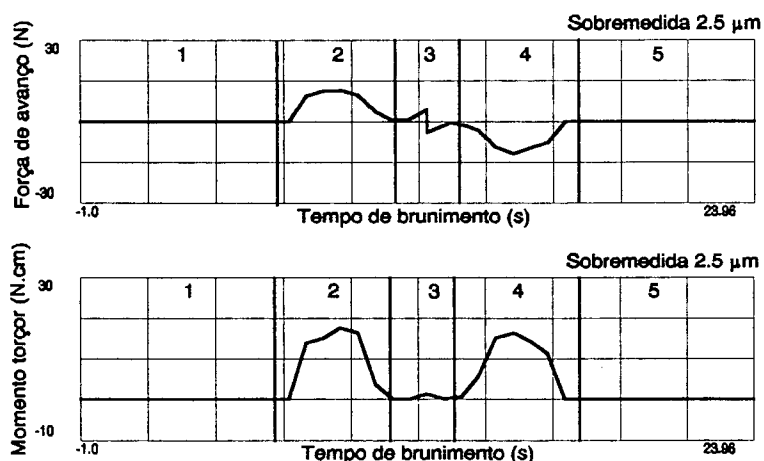


Figura 5.4 - Gráficos de  $F_f$  e  $M_t$  para ferramenta D50

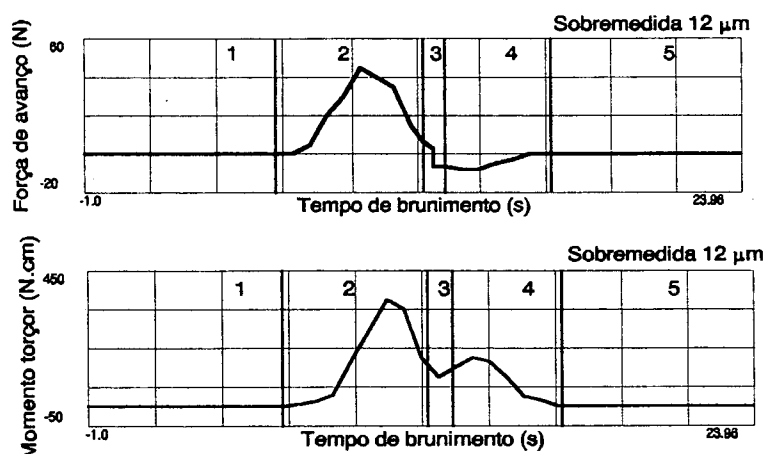


Figura 5.5 - Gráficos de  $F_f$  e  $M_t$  para ferramenta D150

Na primeira região dos gráficos, tem-se a entrada da ferramenta na peça. Como o diâmetro da ferramenta é reduzido, no primeiro terço de seu comprimento, têm-se apenas pequenos picos de  $F_f$  e  $M_t$ , resultantes de toques eventuais na peça, devido ao "cambaleamento" da ferramenta.

Em seguida, na segunda região, inicia-se a remoção de material e o crescimento tanto de  $F_f$  quanto de  $M_t$ , que se deve ao aumento gradual de diâmetro da ferramenta, bem como ao atrito entre as pedras e o furo. Nesta fase a ferramenta é totalmente guiada pelo furo da peça. Isto ocorre até que toda a região de maior diâmetro ultrapasse o limite inferior da peça.

Na terceira região acontece a inversão no sentido de avanço e há uma diminuição da velocidade de corte, conseqüentemente, no passo do helicóide gerado pela trajetória da ferramenta. Esta pode ser a possível causa do aumento das forças nesta região, o que é bem mais visível na figura 5.4, a qual se refere à usinagem de pequenas sobremedidas com ferramenta de granulometria D50. Nestas condições os fenômenos de atrito são bastante significativos. Com o emprego de diamante com granulometria D150 este campo é reduzido e, dependendo da sobremedida removida, é imperceptível, como ocorre na figura 5.5.

Na quarta região, observa-se novamente o crescimento tanto de  $F_f$  quanto de  $M_t$ , já que, como na fase inicial, tem-se o aumento gradual do diâmetro da ferramenta. Teoricamente nesta região não existe corte, pois a remoção com ferramentas "Precidor" ocorre em um único sentido, logo o nível dos esforços deveria ser bem menor do que na entrada da ferramenta, como ocorre para uma sobremedida de 12  $\mu\text{m}$ , figura 5.4. Todavia, este comportamento não é observado na remoção de 2,5  $\mu\text{m}$ , figura 5.5, pois nesta condição, mesmo na entrada da ferramenta, os fenômenos relacionados ao atrito são bem mais significativos que os fenômenos de corte.

Na etapa final, após toda a região de corte da ferramenta ter ultrapassado o limite superior da peça, os esforços caem a zero e os picos que se apresentam, eventualmente, são também resultantes de pequenos toques da guia da ferramenta na peça.

O estudo foi desenvolvido para um campo de sobremedidas de 1 a 12  $\mu\text{m}$ , para a ferramenta D50 e 2 a 30  $\mu\text{m}$ , para a ferramenta D150. A análise dos resultados obtidos é mostrada a seguir.

#### 5.4. Análise dos resultados

É intuitivo afirmar que os valores das componentes da força de usinagem cresçam com o aumento da seção usinada. Porém, pouco se sabe a respeito destas forças ao longo do processo, ou seja, a que nível de grandezas se encontram durante a entrada e o retorno da ferramenta, como variam com a granulometria da ferramenta, sua relação com a forma inicial do furo, e qual o fenômeno predominante nas diferentes etapas, se corte ou atrito.

Todos estes fatores podem fornecer informações importantes, relacionadas ao processo, como limite de material a ser removido com determinada granulometria, em que faixa de sobremedida pode ocorrer determinado tipo de desgaste e qual o campo mais adequado à usinagem, além de propiciarem um melhor conhecimento e entendimento do processo.

Para a avaliação dos resultados foi elaborada uma série de gráficos, interpretados com o auxílio da análise de variância dos dados. Esta análise permitiu verificar qual o fator mais incisivo sobre a força de avanço  $F_f$  e o momento torçor  $M_t$ , nas diferentes faixas de remoção.

Cabe salientar que, cada sobremedida adotada expressa um valor compreendido dentro de um faixa, já que foi impossível determinar um valor fixo para a remoção, devido a toda aleatoriedade que envolve o processo. A tabela 5.1 mostra o valor das sobremedidas correspondentes a cada campo.

**Tabela 5.1 - Campo de sobremedidas empregadas nos ensaios**

SOBREMEDIDA														
NÍVEL	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	6	8	9	12	16	22	32
MÍNIMO	0.8	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.5	5.5	7.5	8.5	11	15	20.5	30
MÁXIMO	1.2	1.7	3.2	2.7	3.2	3.7	4.5	6.5	8.5	9.5	13	17	23.5	34



### 5.4.1. Ff e Mt em Função da Sobremedida com Ferramenta D50

Durante a execução dos ensaios observou-se que os gráficos do comportamento de Ff e Mt apresentavam características diferentes, dependendo da faixa de sobremedida brunida.

Para facilitar o estudo, definiu-se a análise dos resultados em relação a dois casos distintos. O primeiro compreende as sobremedidas entre 1 e 3,5  $\mu\text{m}$  e, o segundo caso sobremedidas entre 4 e 12  $\mu\text{m}$ . Os dados estão, ainda, agrupados dentro das três famílias de desvio de forma mencionados anteriormente.

A tabela 5.2 apresenta os resultados da força de avanço obtidos no brunimento com ferramenta de granulometria D50.

**Tabela 5.2 - Resultados da força de avanço Ff**

ENSAIO												
Caso 1	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	yi..	yim	s
1,00	8.53	9.15	9.74	10.80	10.91	11.65	13.73	13.01	14.37	100.89	11.21	1,92
1,50	8.82	9.32	9.83	10.51	10.91	13.67	13.34	13.58	14.71	103.69	11.52	2,10
2,00	8.92	10.34	10.40	11.82	13.61	13.62	13.80	13.40	14.72	107.63	11.96	1.79
2,50	9.57	10.15	11.31	11.62	13.42	13.44	13.12	13.92	15.92	110.50	13.28	1,94
3,00	9.75	9.79	11.10	11.89	13.83	13.94	14.23	14.90	16.57	115.00	13.78	2,35
3,50	11.20	13.63	13.93	13.41	13.71	13.72	14.89	15.64	16.80	124.93	13.88	1,68
Totais yj	183.48			220.48			258.68			663.64	13.27	
Caso 2	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2		3	4		5	6		yi..	yim	s
4,00	13.55	13.81		14.24	14.42		15.83	17.53		87.38	14.56	1.88
6,00	18.94	19.20		21.00	21.99		23.88	25.32		129.33	21.56	3.40
8,00	25.44	27.90		29.30	29.58		31.27	37.08		180.57	30.10	3.94
12,00	39.89	43.11		44.27	47.10		47.10	51.71		274.76	45.79	4.23
Totais yj	199.84			221.90			250.30			673.04	28.00	

A análise da variância dos dados, segundo o método descrito no capítulo 4, permite elaborar a tabela 5.3, que fornece informações sobre a influência da sobremedida, do erro de forma e da interação destes dois fatores sobre a força de avanço  $F_f$ .

**Tabela 5.3 - Análise de variância para as forças com ferramenta D150**

Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	41.71	5	8.34	11.23	3.48	3258.44	3	1086.15	61.06	3.49
Des form.	157.10	2	78.55	105.70	3.26	159.98	2	79.99	4.50	3.89
Sob x Des	3.51	10	0.35	0.47	3.11	14.75	6	3.46	0.14	3.00
Erro	26.75	36	0.74			213.44	12	17.79		
Total	229.07	53				3471.89	23			

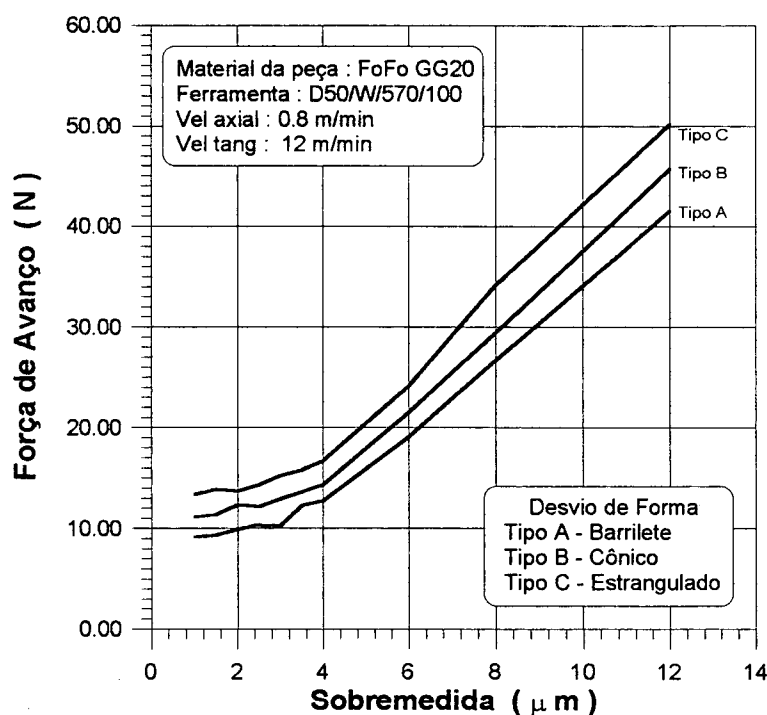
Observando-se  $F_0$  calculado, tanto para o fator sobremedida, quanto para o desvio de forma, constata-se um valor superior ao de  $F_0$  tabelado, o que implica a diferenciação das médias dos dados e uma consequente variação no conjunto. Logo os dois parâmetros influenciam na força de avanço, nos casos 1 e 3.

Contudo, no caso 1, que envolve a faixa das pequenas sobremedidas, o fator mais significativo sobre  $F_f$  foi o desvio de forma. Ao contrário, para o caso 2, o fator preponderante foi a sobremedida de material.

Este fenômeno está, provavelmente, relacionado às pequenas pressões de contato existentes nos baixos níveis de remoção. Como a força passiva  $F_p$  envolvida é pequena, a penetração dos gumes é limitada e os fenômenos de corte são diminuídos. Por isto, a forma do furo é importante nesta situação, pois grande parcela do esforço gerado durante o brunimento deve estar relacionado ao atrito que ocorre entre as superfícies do furo e da ferramenta. Assim as peças em barrilete, as quais apresentam um menor volume de material a remover, geram menores esforços que as peças cônicas ou estranguladas, em uma mesma sobremedida. A medida que são removidas maiores sobremedidas, cresce a pressão de contato, favorecendo todo o mecanismo de

corte. Ou seja, como ocorre uma maior penetração dos grãos torna-se mais fácil que o mesmo atinja a espessura mínima de corte e os esforços ligados à deformação do material são, em parte, substituídos por forças de arrancamento de cavacos. Em virtude dos erros de forma das peças estarem situados entre 3.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ , e as sobremedidas num campo que envolve valores maiores, no caso 2 o desvio de forma é um fator menos importante, apesar de exercer certa influência sobre a força de avanço.

A figura 5.6 mostra o gráfico da força de avanço em função da sobremedida, para os três erros de forma existentes nas peças estudadas.



**Figura 5.6** - Força de avanço em função da sobremedida para os erros de forma do tipo A, B e C

Na região inicial, até aproximadamente 4  $\mu\text{m}$ , as curvas apresentam uma pequena inclinação, onde o erro de forma tem grande importância nos resultados de  $F_f$ . A partir deste ponto, a inclinação das curvas aumenta e a sobremedida de material passa a influir mais fortemente sobre o processo. O gráfico acima confirma os resultados obtidos na tabela de análise

de variância dos dados.

A figura 5.7 mostra o comportamento médio das forças de avanço ocorridas em cada sobremedida. As linhas tracejadas representam a dispersão da medição dos dados, a qual foi calculada pela expressão,

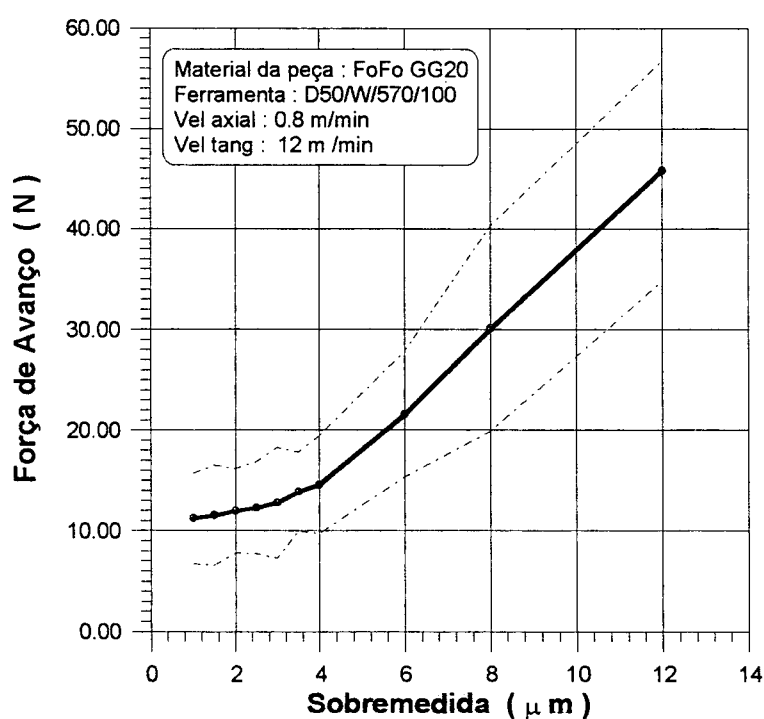
$$DM = \pm ts$$

onde,

DM : dispersão da medição ;

t : coeficiente de "student" e

s : desvio padrão da amostra [53].



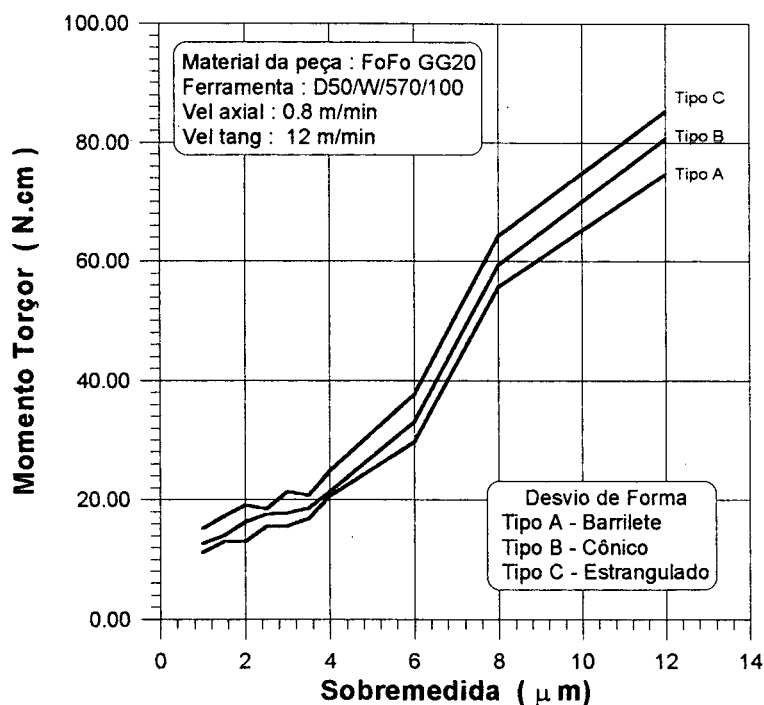
**Figura 5.7** - Dispersão dos resultados da força de avanço para ferramenta D50

Na região inicial a dispersão dos dados é relativamente grande, o que impossibilita afirmar crescimento da força de avanço com a sobremedida, nesta faixa. Entretanto, na região posterior,

apesar dos dados divergirem em até 20 % , a tendência de crescimento de  $F_f$  é nítida.

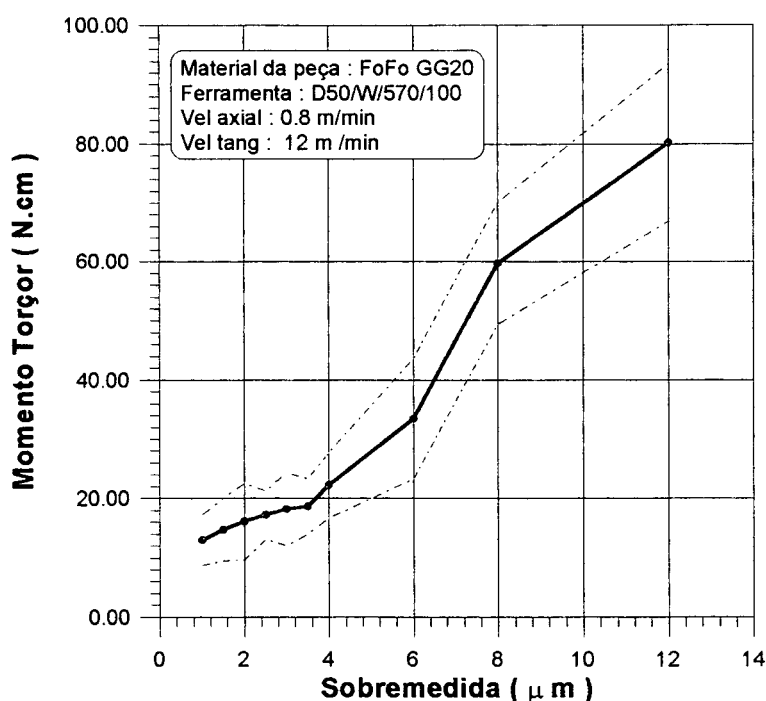
O comportamento do momento torçor é análogo ao da força de avanço, na usinagem com a ferramenta D50, existindo uma pequena influência da sobremedida para pequenas remoções enquanto que a forma do furo é preponderante. Isto também se inverte com o aumento da profundidade de corte, de forma semelhante ao que acontece com  $F_f$ . As tabelas que apresentam os resultados e a análise de variância dos dados de momento torçor com a ferramenta D50 estão no anexo C.

A figuras 5.8 mostra o gráfico de comportamento do momento torçor em função da sobremedida de material removido, para os três erros de forma existentes nas peças estudadas.



**Figura 5.8** - Momento torçor em função da sobremedida para os erro de forma do tipo A, B e C

A figura 5.9 mostra o comportamento da média dos momentos torçores gerados no brunimento de cada sobremedida estudada.



**Figura 5.9** - Dispersão dos resultados do momento torçor

Neste gráfico, também na região inicial, a dispersão dos dados não permite afirmar que exista o crescimento do momento torçor com a elevação da sobremedida e a partir de 4 μm esta tendência é estabelecida.

#### 5.4.2. Ff e Mt em Função da Sobremedida para Granulometria D150

O brunimento com a ferramenta D150, composta de grãos de diamante com maior tamanho, gera um elevado gradiente entre as forças na entrada e no retorno da ferramenta, o qual se deve também ao atrito, mas principalmente aos fenômenos de corte existentes que são preponderantes já no início do processo.

Esta é a provável causa da existência de menores forças de avanço com o uso da ferramenta D150, do que com o uso da ferramenta D50, na usinagem de uma mesma faixa de sobremedidas.

A tabela 5.4 apresenta os resultados da força de avanço obtidos no brunimento com ferramenta de granulometria D150.

**Tabela 5.4 - Resultados da força de avanço Ff**

ENSAIO									
Caso 1	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
2,00	4.79	6.63	6.58	7.01	8.34	9.51	43.86	7.14	1.62
3,00	7.73	7.94	8.07	8.69	9.13	9.58	51.54	8.59	0.86
4,00	7.59	8.78	8.81	9.47	10.59	11.02	56.62	9.44	1,17
Totais yj	43.82		48.63		58.57		151.02		
Caso 2	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
6.00	13.06	14.38	15.63	16.90	17.02	17.55	94.54	15.76	1.75
9.00	31.05	33.50	33.75	35.04	36.00	37.24	206.58	34.43	3.17
13.00	33.97	35.41	14.24	37.73	39.99	45.88	230.65	38.44	4.20
16.00	55.23	57.94	37.67	59.73	61.12	67.08	359.45	59.91	4.03
23.00	75.37	77.19	58.35	84.00	87.20	88.54	493.35	83.06	5.38
30.00	108.30	110.04	80.05	116.56	118.07	123.73	687.17	114.53	5.52
Totais yj	645.44		686.88		738.42		2070.74		

A comparação dos resultados mostra que as forças com a ferramenta D150 são de aproximadamente 15 a 60% menores, sendo que a relação decresce à medida em que a sobremedida aumenta. Com isto procura-se demonstrar quão influente é o atrito nas pequenas sobremedidas, principalmente com as ferramentas de grãos abrasivos menores.

Na tabela 5.5 são apresentados os resultados da análise de variância para as forças de avanço com a ferramenta D150.

**Tabela 5.5 - Análise de variância para as forças com ferramenta D150**

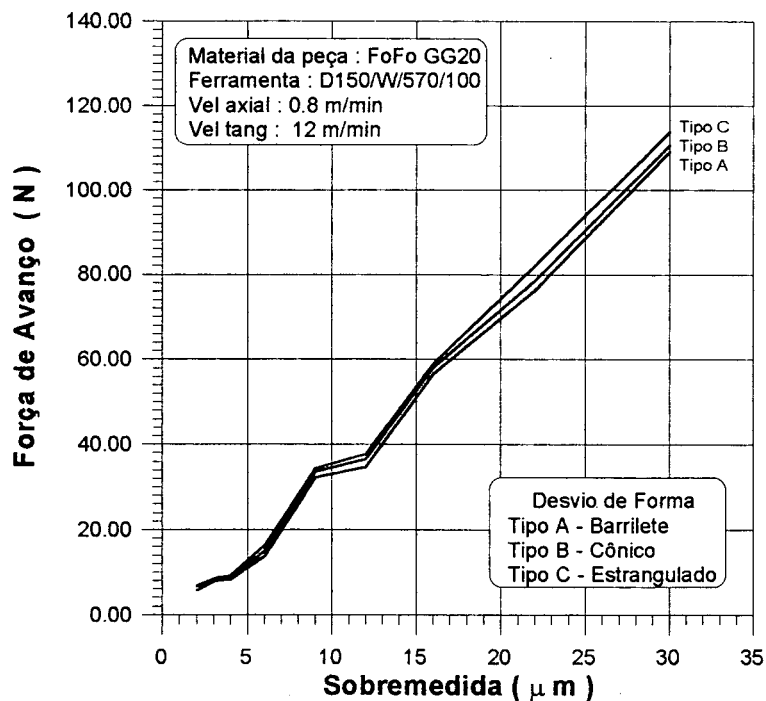
Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	16.14	2	8.07	19.63	4.26	38994.55	5	7798.91	1129.31	3.11
Des form.	18.86	2	9.43	23.94	4.26	361.64	2	180.82	26.18	3.89
Sob x Des	1.15	4	0.29	0.70	3.63	60.33	10	6.03	0.87	3.75
Erro	3.70	9	0.41			83.87	12	6.91		
Total	39.85	17				39499.39	35			

O teste F permite concluir que novamente existe influência da ação das variáveis, sobremedida e forma, sobre as forças alcançadas no processo, pois  $F_0$  tabelado é menor que  $F_0$  calculado. Porém, desta vez, no caso 1 os dois fatores agem quase com a mesma intensidade sobre os resultados, ou seja, influem de forma semelhante sobre as médias dos dados.

No caso 2, a remoção de material é maior, logo a forma das peças passa a ser um aspecto secundário sobre a força, apesar de alguma influência continuar a existir. A sobremedida passa a ser o fator preponderante sobre o comportamento da força de avanço, porque como já foi explicado, existe um favorecimento aos mecanismos de corte quando são alcançadas pressões de contato mais elevadas.



A figura 5.10 mostra o gráfico da força de avanço em função da sobremedida para os diferentes desvios de forma encontrados nas peças.

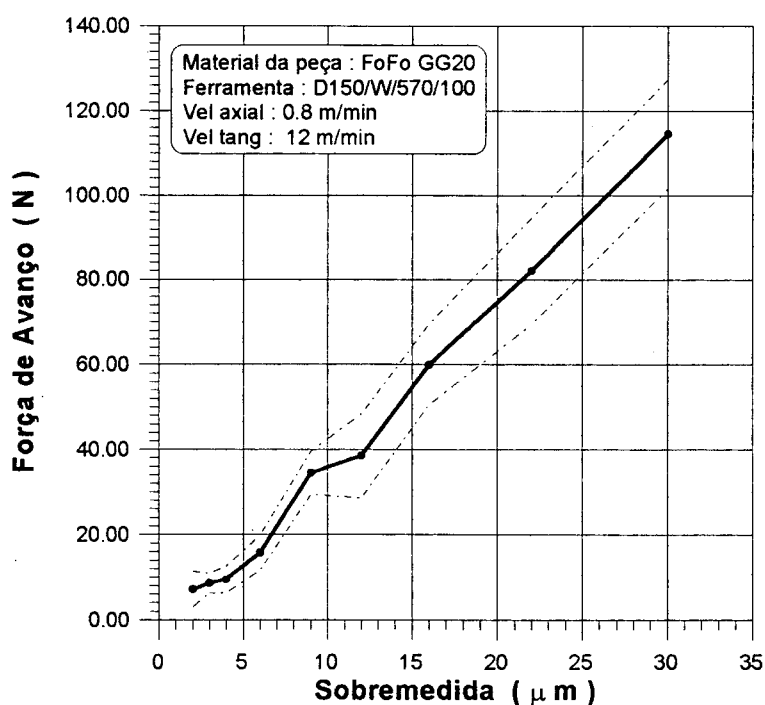


**Figura 5.10-** Força de avanço em função da sobremedida para os erros de forma do tipo A, B e C

Na região inicial das curvas há um pequeno crescimento das forças, que se torna bastante acentuado após ultrapassada a remoção de 4  $\mu m$ .

Como o que aconteceu para a ferramenta D50, fica clara a pequena influência da forma das peças, ao longo do processo, se comparada com a sobremedida de material bruido, também para a ferramenta D150.

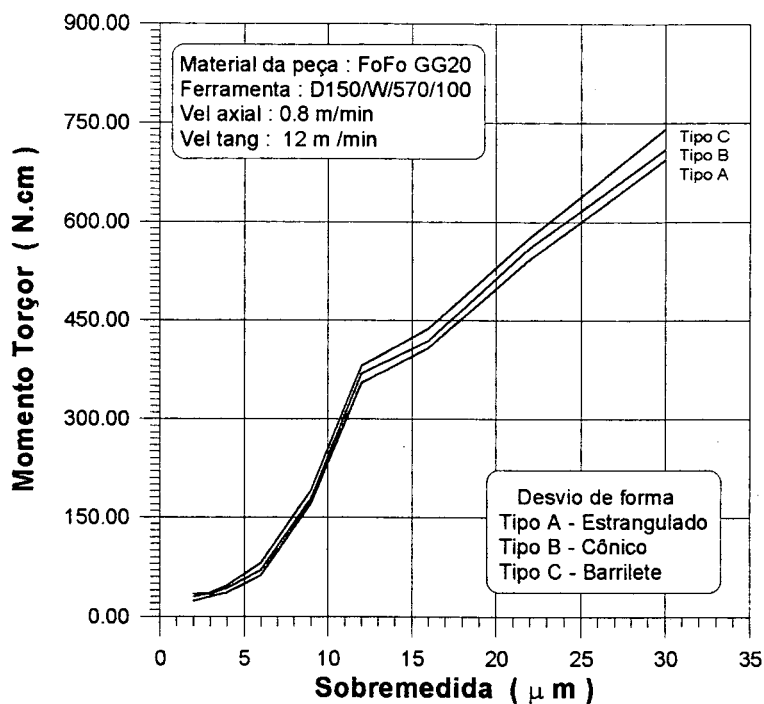
A figura 5.11 apresenta a dispersão dos dados de força de avanço, no brunimento com ferramenta D150.



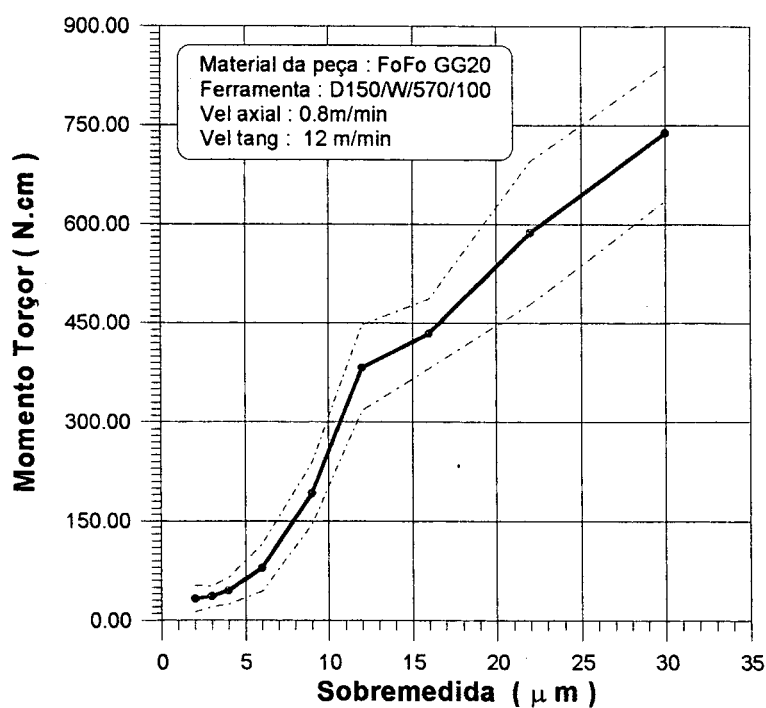
**Figura 5.11** - Dispersão da força de avanço para a ferramenta D150

No gráfico acima, pode-se observar que, apesar do primeiro ponto da curva apresentar uma dispersão um pouco maior que os dois seguintes, a tendência de crescimento da força com o aumento da sobremedida é nítida, a partir da região inicial da curva. Este comportamento difere um pouco do que foi observado no brunimento com a ferramenta de granulometria menor.

O momento torçor se comporta de maneira semelhante à força de avanço, no brunimento com a ferramenta D150. As figuras 5.12 e 5.13 mostram os gráficos do comportamento e da dispersão dos dados de  $M_t$  em função da sobremedida. As tabelas de resultados e de análise de variância estão no anexo C.



**Figura 5.12-** Momento torçor em função da sobremedida para os erros de forma do tipo A, B e C



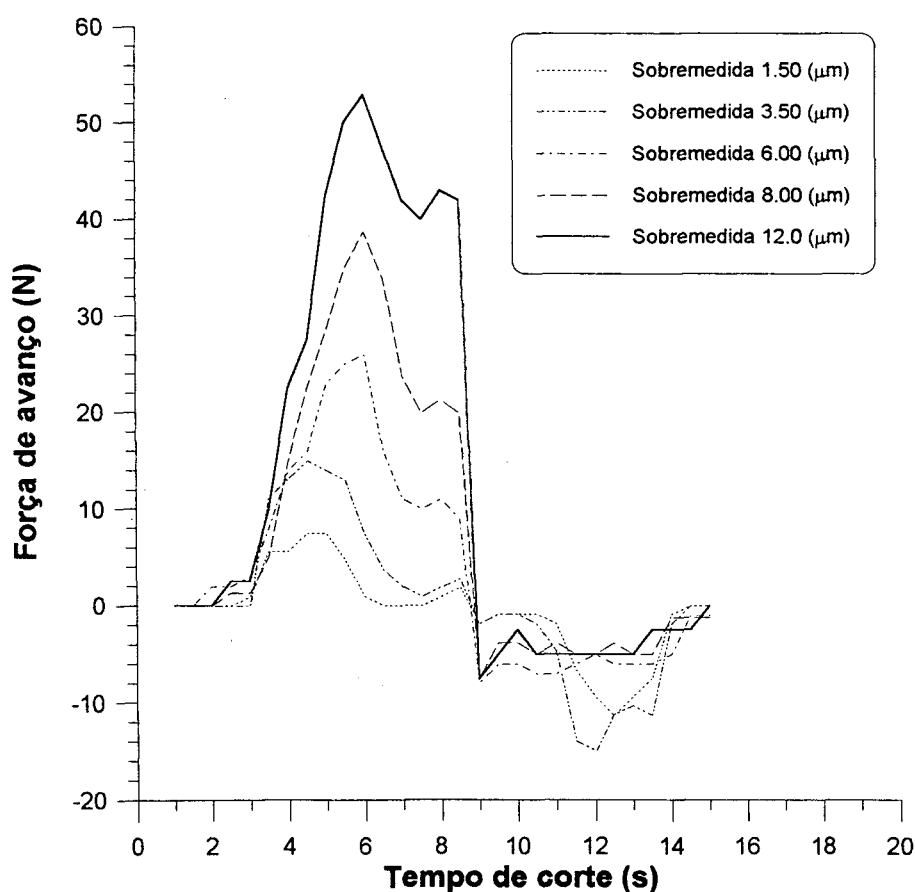
**Figura 5.13 -** Dispersão do momento torçor para a ferramenta D150

### 5.4.3. Análise Comparativa

Durante o brunimento com as ferramentas "Precidor" os esforços gerados na entrada e saída da ferramenta, teoricamente, deveriam ser diferentes. Faz-se esta consideração porque, já que a remoção é executada em um único ciclo, todo o sobremetal seria retirado na entrada da ferramenta e os esforços na saída se aproximariam de zero. Todavia, deve-se contar com a deformação da ferramenta a qual é função de sua rigidez e da sobremedida a usar.

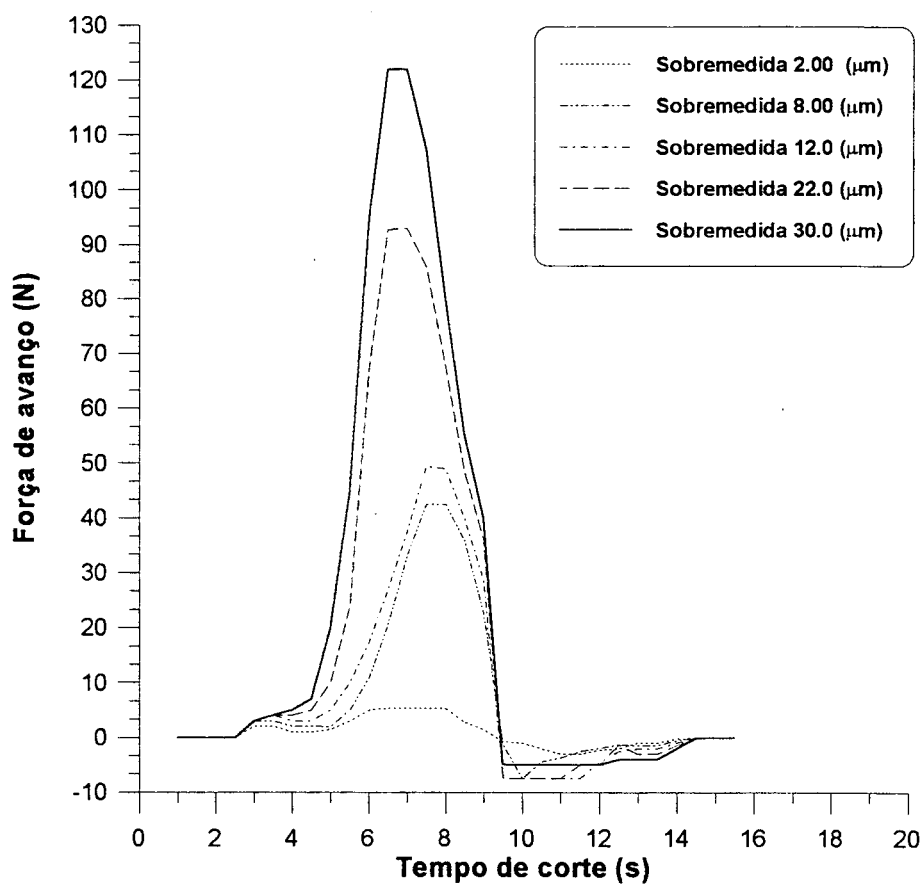
No caso da remoção de pequenas sobremedidas a relação destes esforços é aproximadamente unitária, demonstrando que a parcela das forças referentes à remoção é baixa e a parcela referente ao atrito elevada.

A figura 5.14 mostra a análise comparativa entre as forças de avanço  $F_f$ , obtidas com cada sobremedida, para a ferramenta D50.



**Figura 5.14** - Evolução da força de avanço com a sobremedida para ferramenta D50

A figura 5.15 mostra a análise comparativa entre as forças de avanço  $F_f$ , obtidas com cada sobremedida, para a ferramenta D150.



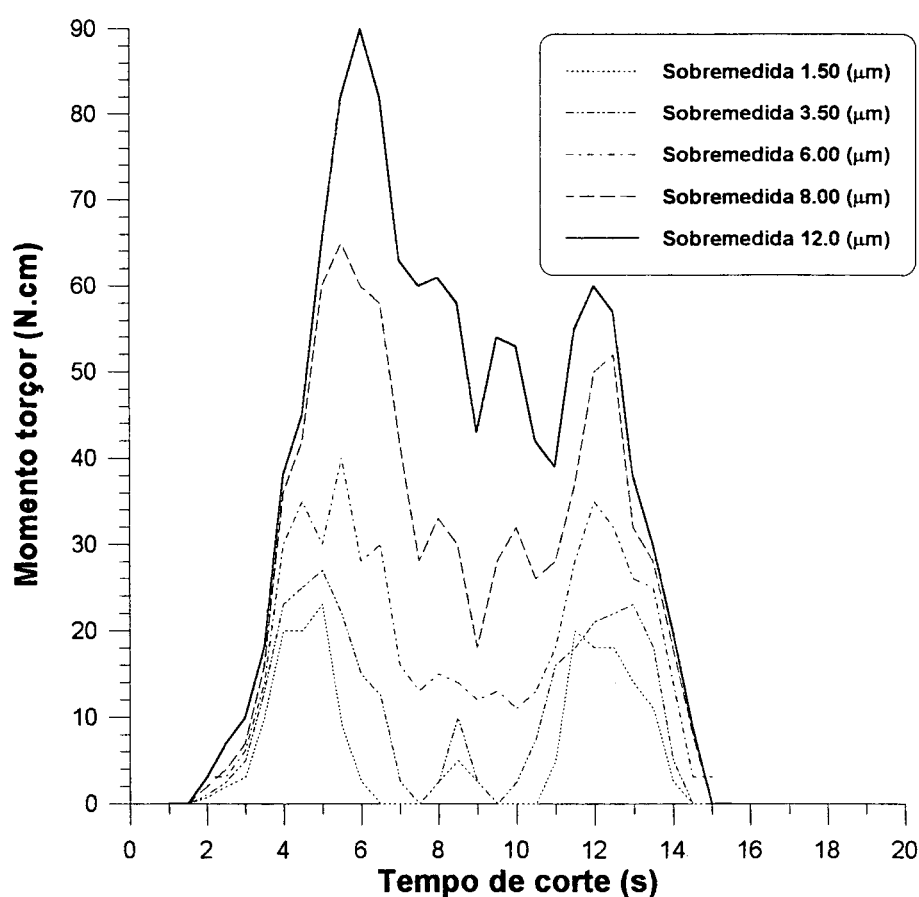
**Figura 5.15** - Evolução da força de avanço com a sobremedida para ferramenta D150

Nos dois gráficos apresentados, aproximadamente aos nove segundos de brunimento, tem-se a inversão no sentido de avanço e o retorno da ferramenta. Após esta etapa, ainda se constata a presença da força de avanço no processo.

Pode-se observar que, com a elevação da sobremedida a brunir, a parcela de força referente ao retorno da ferramenta diminui consideravelmente. Por exemplo, no brunimento da sobremedida 1.5  $\mu\text{m}$ , com a ferramenta D50,  $F_f$  situa-se próximo a 9 (N) na entrada e no retorno, enquanto que para uma sobremedidade de 8  $\mu\text{m}$ , estes valores são 40 e -4 (N) respectivamente. Este

fenômeno se torna mais marcante no brunimento com a ferramenta D150.

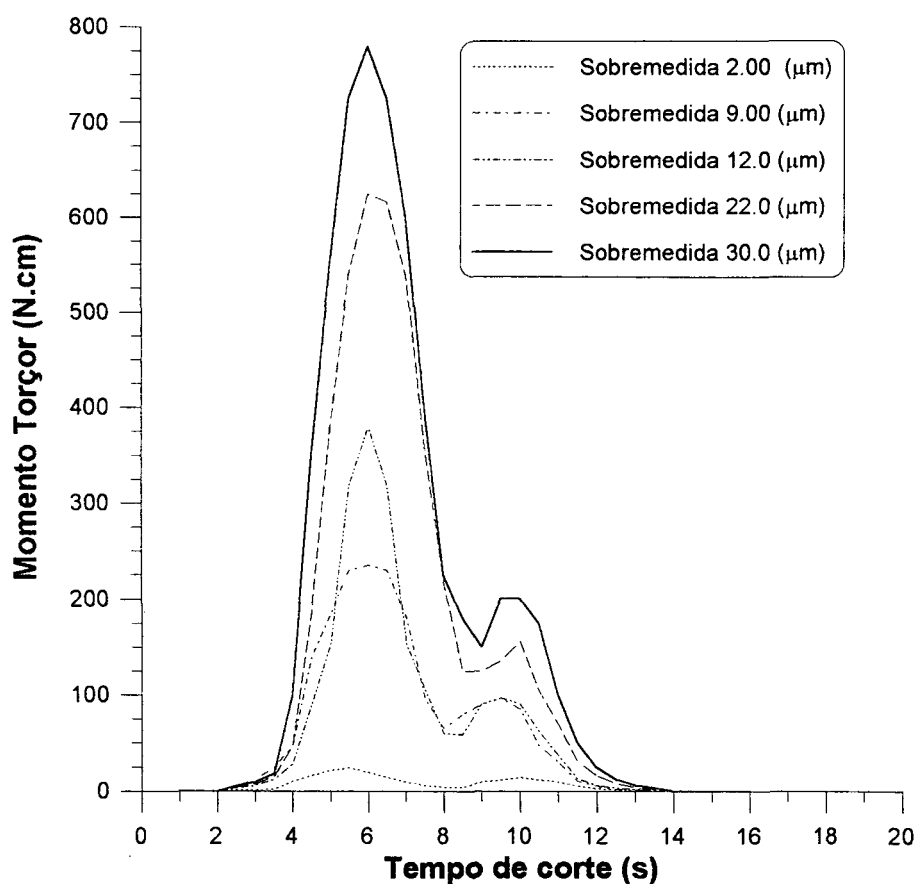
Quanto ao momento torçor, valem as mesmas considerações feitas a respeito da força de avanço. A figura 5.16 mostra a análise comparativa entre os momentos torçores  $M_t$ , obtidos com cada sobremedida, para a ferramenta D50.



**Figura 5.16** - Evolução do momento torçor com a sobremedida para ferramenta D50

De forma semelhante ao que acontece com a força de avanço, o momento torçor desenvolvido com a ferramenta de maior granulometria apresentou uma relação maior entre os esforços no início e no final do processo.

A evolução do comportamento do momento torçor em função da sobremedida, no brunimento com a ferramenta D150 é mostrado na figura 5.17.



**Figura 5.17** - Evolução do momento torçor com a sobremedida para ferramenta D150

No capítulo cinco foi mostrado o comportamento característico da força de avanço e do momento torçor, no brunimento "Precidor". Estes esforços foram analisados em relação a sobremedida e ao desvio de forma inicial das peças, sendo procedida também a análise comparativa para as diversas faixas de remoção. A seguir, no capítulo seis, serão estudadas as grandezas de entrada do processo.

# **CAPÍTULO 6**

## **GRANDEZAS DE ENTRADA INFLUENTES NO BRUNIMENTO VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo, procura-se mostrar a aplicação das técnicas Taguchi, para a determinação das grandezas que influem no processo de brunimento "Precidor". Este estudo se traduz em uma análise preliminar para a avaliação do processo, fundamentando um enfoque mais aprofundado na sequência deste trabalho.

O estudo é feito mediante a execução de duas etapas experimentais, onde na primeira é analisada a influência dos diversos fatores, objetivando-se a otimização do fator mais influente. Em seguida, na fase complementar, observa-se quais, entre os fatores restantes, exercem maior domínio sobre o brunimento.

### **6.2. METODOLOGIA DO ENSAIO**

O objetivo do estudo é analisar a influência de fatores como a sobremedida de material, desvio de forma e rugosidade inicial da peça, curso, rotação e avanço da ferramenta, sobre a qualidade geométrica e superficial da peças brunidas.

A análise de variância é, também, empregada neste caso, porém os experimentos são tomados de forma fracionária.



### **6.2.1. Desenvolvimento do Experimento**

Para a execução dos ensaios utilizou-se como corpos de prova os blocos do compressor EM e as grandezas de entrada, bem como os seus níveis, foram estabelecidas como mostrado no capítulo 4.

Para o desenvolvimento do ensaio foi elaborada uma tabela, baseada na matriz ortogonal L16, contendo as variáveis envolvidas no estudo. Os dezesseis experimentos foram executados em uma sequência desordenada, o que proporciona uma maior aleatorização no método.

Durante o brunimento, os corpos de prova foram posicionados no dispositivo de fixação, que impede o seu movimento de giro, porém permite um pequeno deslocamento no sentido axial e radial, devido à folga necessária para o ajuste do furo com a ferramenta.

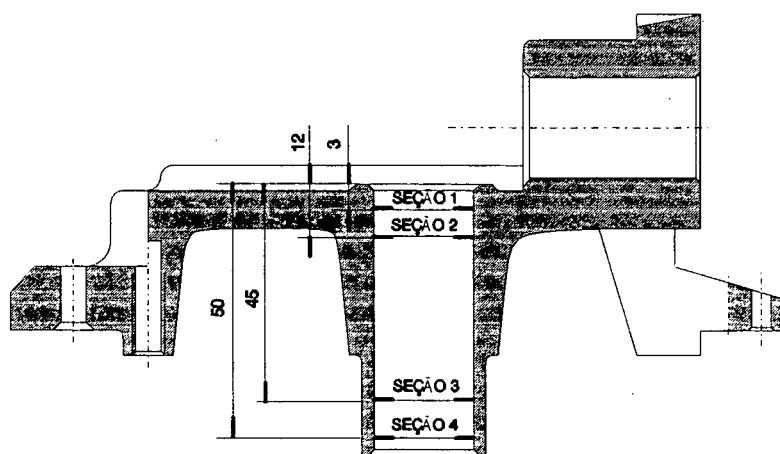
Após o brunimento as peças foram encaminhadas à metrologia, sendo verificadas a forma e a rugosidade finais do furo brunido.

#### **- Seleção e classificação dos corpos de prova**

Os corpos de prova utilizados foram coletados diretamente da produção, num período de uma semana, durante os três turnos de trabalho da empresa. Pretendia-se com isto uma amostra que representasse melhor o perfil das peças produzidas na máquina "transfer", antes do processo de brunimento.

Para a primeira etapa de ensaios, foram coletadas trinta e oito peças e na segunda vinte e oito, sendo que destas selecionou-se grupos de dezesseis unidades, com as características mais apropriadas à aplicação da matriz ortogonal. Esta adequação está relacionada à combinação dos níveis das variáveis em cada experimento. Por exemplo, uma determinada combinação experimental deve envolver os níveis altos de sobremedida e curso, com os níveis baixos de rotação, avanço e conicidade, porém esta condição não foi alcançada por mais que uma peça. Este tornou-se um fator limitante na replicação do experimento.

Os dados relacionados às dimensões dos primeiros corpos de prova analisados foram obtidos com o emprego do medidor pneumático. Já, para os corpos de prova verificados na segunda etapa do trabalho a cilindridade e a circularidade foram obtidas pelo circularímetro THR e o diâmetro, medido em quatro posições, obtido junto a máquina de medir por coordenadas ZEISS. As seções de medição do bloco do compressor EM são mostradas na figura 6.1.



**Figura 6.1 - Seções de medição do bloco EM**

### **- Montagem da matriz experimental**

#### **• Matriz da primeira etapa de ensaios**

Como apresentado no capítulo 4, a matriz selecionada e mais adequada para o ensaio é uma matriz ortogonal L16. Esta matriz permite analisar a influência de quinze fatores sobre um resultado qualquer. Neste estudo verifica-se a influência de seis fatores principais e de três interações, de modo que algumas das colunas da matriz permaneceram vazias.

As linhas da matriz, apresentada na tabela 6.1, estão em posições diferentes das ocupadas na matriz L16 original, isto porque se realizou um sorteio para ordenar a execução dos experimentos.

Tabela 6.1 - Matriz experimental

		FATORES ( VARIÁVEIS DE ENTRADA)													
		A	B	AB	C	AC	BC	ED	E	X	F	X	X	X	D
ENS	PÇ	CILIND	SOBR	CILSOB	CUR	CILCUR	SOBCUR	ROTAV	ROT		RUG				AV
1	5	0.009	0.058	1	C	1	1	1	150		3.74				0.8
2	1	0.009	0.054	1	C	1	1	1	250		3.93				1.6
3	7	0.010	0.060	1	L	2	2	2	150		3.77				1.6
4	4	0.002	0.054	1	L	2	2	2	250		3.71				0.8
5	16	0.008	0.046	2	C	1	2	2	250		3.38				1.6
6	10	0.010	0.042	2	C	1	2	2	250		3.24				0.8
7	11	0.006	0.033	1	L	1	1	2	150		3.24				1.6
8	9	0.002	0.045	2	L	2	1	1	250		3.23				1.6
9	3	0.026	0.052	2	C	2	1	2	150		3.21				1.6
10	2	0.013	0.053	2	C	2	1	2	250		3.36				0.8
11	8	0.016	0.061	2	L	1	2	1	250		3.00				0.8
12	6	0.013	0.057	2	L	1	2	1	250		3.57				1.6
13	13	0.017	0.042	1	C	2	2	1	150		3.24				0.8
14	15	0.014	0.036	1	C	2	2	1	250		3.23				1.6
15	12	0.023	0.061	1	L	1	1	2	150		3.24				1.6
16	14	0.023	0.039	1	L	1	1	2	250		3.61				0.8

CILIND : Cilindricidade da peça (mm);

SOBR : Sobremedida de material (mm);

CILSOB : Inter. cilindricidade x sobremedida;

CUR : Curso da ferramenta (mm);

CILCUR : Inter. cilindricidade x curso;

SOBCUR : Inter. sobremedida x curso;

ROTAV : Inter. rotação x avanço;

ROT : Rotação (RPM);

RUG : Rugosidade ( $\mu\text{m}$ );

AV : Avanço (mm/min).

**OBS:** a sobremedida adotada na tabela é a teórica, ou seja, a diferença entre o diâmetro da peça medido antes do brunimento e o diâmetro nominal após esta operação. Os valores reais são diferentes pois, como explicado anteriormente no capítulo 5, durante o processo existe a deformação da ferramenta e a remoção real é menor que a teórica.

• **Matriz da segunda etapa de ensaios**

No desenvolvimento desta etapa, o andamento dos experimentos poderia ser desenvolvido com o uso de uma matriz L8, já que se tem apenas seis graus de liberdade associados ao problema e a análise é feita em dois níveis.

Contudo uma matriz L16 foi empregada, para que o mesmo número de ensaios fosse procedido nas etapas distintas. A tabela 6.2 mostra a configuração do arranjo para o segundo experimento.

**Tabela 6.2 - Matriz experimental**

		FATORES ( VARIÁVEIS DE ENTRADA)															
ENS	PÇ	A	B	AB	X	X	X	ED	E	X	X	X	X	X	X	X	D
		CILIND	SOBR	CILSOB				ROTAV	ROT								AV
1	13	0.0183	0.057	1				1	150								0.8
2	10	0.0204	0.040	1				2	250								0.8
3	6	0.0155	0.042	1				2	250								0.8
4	15	0.0181	0.041	2				1	150								1.6
5	5	0.0136	0.036	1				1	150								1.6
6	1	0.0133	0.055	1				1	150								0.8
7	14	0.0176	0.042	1				2	250								1.6
8	3	0.0146	0.045	2				1	150								1.6
9	12	0.0178	0.051	2				2	250								1.6
10	4	0.0128	0.057	2				2	250								0.8
11	2	0.0152	0.050	1				2	250								1.6
12	8	0.0165	0.034	2				2	250								1.6
13	7	0.0129	0.037	2				1	150								0.8
14	11	0.0185	0.053	2				1	150								0.8
15	9	0.0171	0.045	1				1	150								1.6
16	16	0.0168	0.043	2				2	250								0.8

### 6.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS GRANDEZAS DE ENTRADA

A seguir serão apresentados os dados obtidos nas duas etapas de ensaios procedidos para a averiguação das grandezas influentes no brunimento "Precidor". Estes dados expressam o resultado da combinação dos vários fatores, em seus dois níveis, sobre o processo.

#### 6.3.1. Resultados da Primeira Etapa de Ensaios

Na tabela 6.3 são apresentados os resultados obtidos na primeira fase de ensaios, na qual, foram observados apenas a cilindricidade, a remoção de material e a rugosidade das peças brunidas.

**Tabela 6.3 - Resultados da primeira etapa**

ENS	PÇ	RESULTADOS ( VARIÁVEIS DE SAÍDA)		
		CILINDRICIDADE	REMOÇÃO	RUGOSIDADE
1	5	0.010	0.047	3.74
2	1	0.025	0.041	3.93
3	7	0.013	0.035	3.77
4	4	0.005	0.038	3.71
5	16	0.021	0.028	3.38
6	10	0.017	0.040	3.24
7	11	0.007	0.031	3.73
8	9	0.009	0.032	3.38
9	3	0.024	0.051	3.21
10	2	0.015	0.039	3.36
11	8	0.009	0.039	3.00
12	6	0.010	0.042	3.57
13	13	0.020	0.029	3.24
14	15	0.0176	0.028	3.23
15	12	0.014	0.034	3.24
16	14	0.005	0.034	3.61

### 6.3.2. Resultados da Segunda Etapa de Ensaios

A tabela 6.4 apresenta os resultados da segunda fase de ensaios, nesta etapa foram observadas a cilindridade, remoção de material, a rugosidade e a circularidade dos corpos de prova brunidos.

**Tabela 6.4 - Resultados da segunda etapa**

ENS	PÇ	RESULTADOS ( VARIÁVEIS DE SAÍDA)			
		CILINDRICIDADE	REMOÇÃO	RUGOSIDADE	CIRCULARIDADE
1	13	0.0066	0.030	1.78	0.0039
2	10	0.0075	0.055	1.02	0.0046
3	6	0.0051	0.032	0.89	0.0029
4	15	0.0064	0.036	3.20	0.0042
5	5	0.0045	0.026	1.96	0.0024
6	1	0.0052	0.047	1.47	0.0033
7	14	0.0059	0.039	1.07	0.0048
8	3	0.0047	0.039	3.08	0.0032
9	12	0.0081	0.043	1.30	0.0048
10	4	0.0043	0.030	0.79	0.0028
11	2	0.0064	0.046	1.20	0.0035
12	8	0.0054	0.048	1.07	0.0034
13	7	0.0059	0.032	1.64	0.0029
14	11	0.0070	0.046	1.08	0.0048
15	9	0.0057	0.043	1.78	0.0042
16	16	0.0064	0.038	1.83	0.0034

O comportamento das grandezas de entrada sobre os resultados do processo de brunimento será interpretado a seguir, através de gráficos que mostram a influência das diversas variáveis sobre uma determinada grandeza de saída.

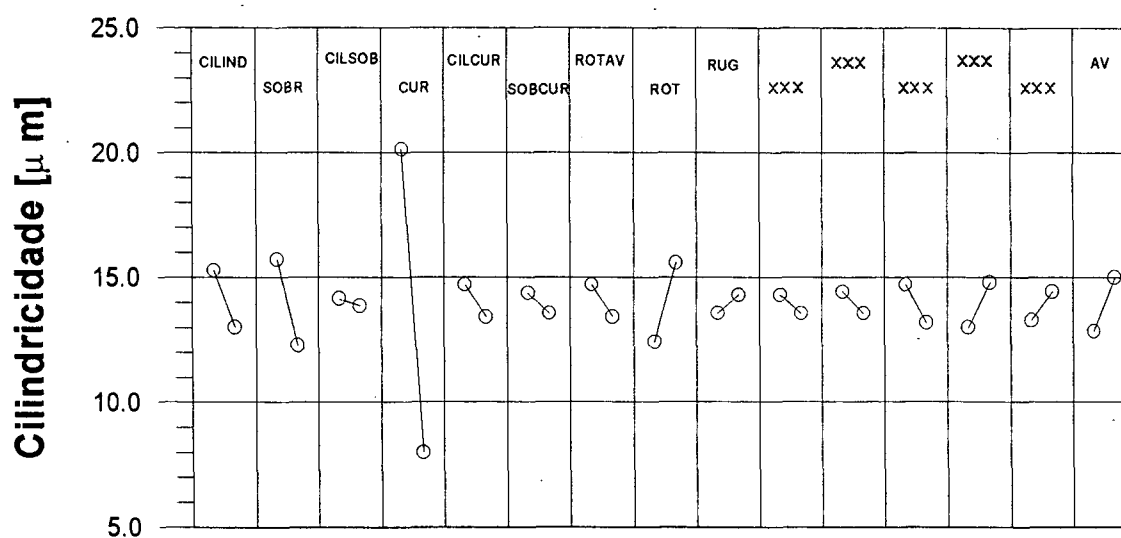
## 6.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise dos resultados dos ensaios de brunimento foi feita com o emprego do software **SADIE**, que emprega as técnicas de Taguchi na análise dos dados obtidos. A influência das diversas grandezas é apresentada de forma gráfica, num conjunto onde são mostrados todos os fatores, o que facilita a interpretação e a comparação entre eles. Cada fator pode também, ser estudado separadamente, para que se proceda uma análise complementar.

A **ANOVA** é outra importante ferramenta de que o software é provido, para a análise dos resultados.

### 6.4.1. Análise dos Resultados da Primeira Etapa

• **Cilindricidade:** a influência das variáveis de entrada do processo sobre o erro de cilindridade das peças brunidas é mostrada na figura 6.2.



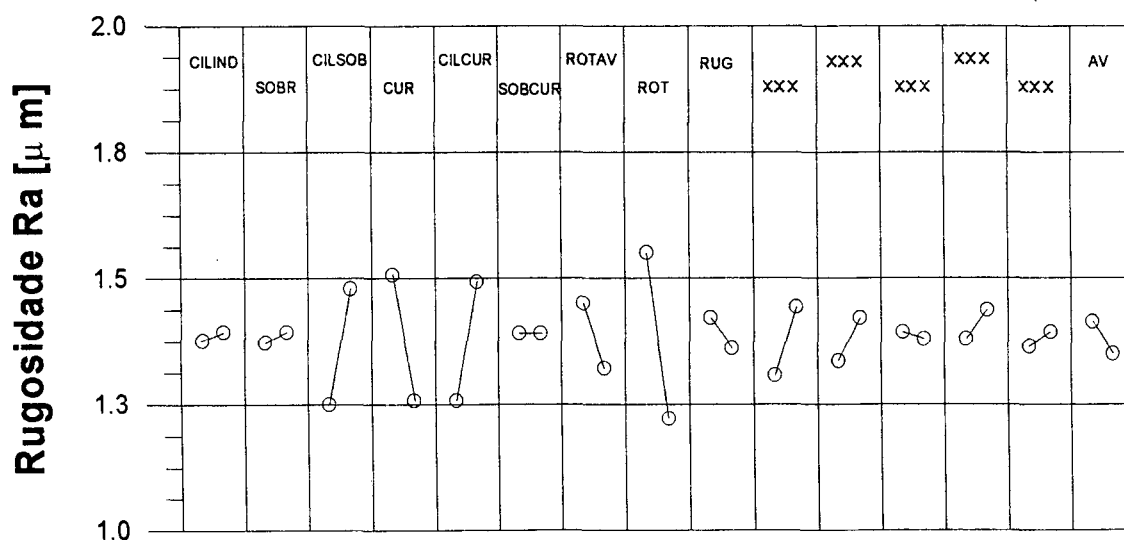
**Figura 6.2** - Relação entre a cilindridade e as grandezas de entrada

Observa-se que o desvio de forma das peças, neste caso, é bastante influenciado pelo curso da ferramenta. No nível baixo, menor curso, apresentam-se os mais elevados erros de forma, enquanto que com o curso maior são obtidos os menores erros de cilindridade na fabricação das peças.

O curso menor corresponde à passagem de um quinto da região de corte da ferramenta, pela extremidade inferior do furo, ao passo que no curso maior um terço desta região ultrapassa a totalidade do furo brunido, o que explica o comportamento da cilindridade.

A análise de variância, anexo D, mostrou que o fator curso influe de forma mais incisiva sobre a cilindridade, isto com uma significância de 99%. Deve-se observar, também, que fatores como a sobremedida e a cilindridade inicial apresentam sua participação sobre o erro de forma, porém de uma forma bem menos significativa.

• **Rugosidade:** a influência das variáveis de entrada do processo sobre a rugosidade das peças brunidas é mostrada na figura 6.3.



**Figura 6.3** - Relação entre a rugosidade e as grandezas de entrada



Neste caso, a rugosidade das peças analisadas é influenciada primordialmente pela rotação da ferramenta. A piora da qualidade superficial acontece quando é empregado o nível baixo deste fator, já, com o aumento da rotação existe uma queda na rugosidade da superfície brunida.

A confiabilidade de que a rotação é o fator dominante sobre a rugosidade do processo é de 99 %, como se pode observar no anexo D. A rotação está diretamente ligada com a velocidade de corte que por sua vez interfere significativamente sobre as rugosidades de processo.

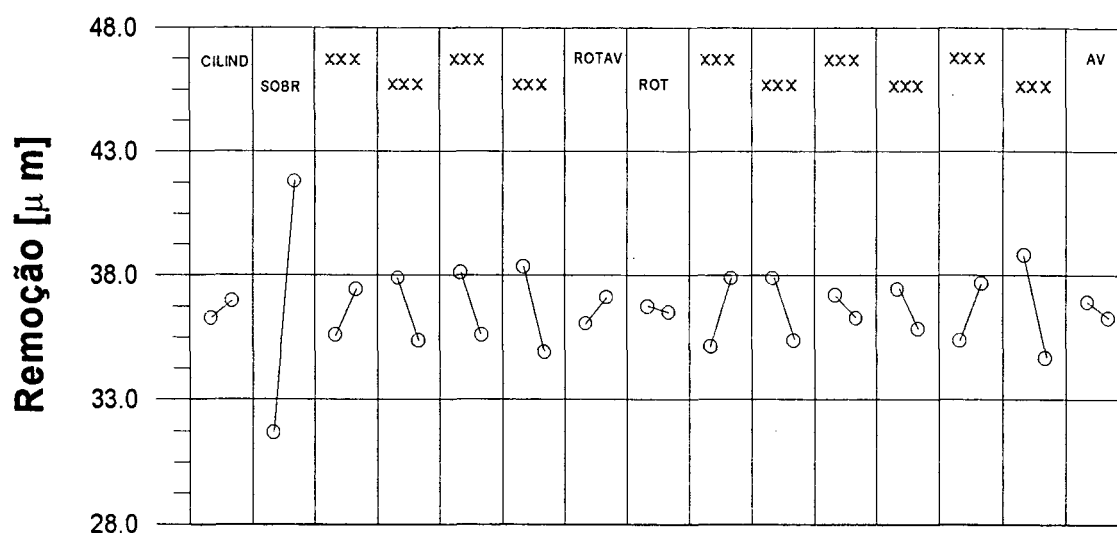
O curso da ferramenta foi, também, um fator de forte influência sobre a característica superficial das peças, constata-se que para o menor curso a rugosidade apresentada é mais elevada, diminuindo com o uso do curso maior. A significância dos resultados é de 99%.

Pode-se relacionar esta influência do curso com o número de grãos abrasivos ativos, nos dois casos. No nível baixo, há um menor número de grãos ativos atuando sobre o furo ocasionando uma elevada rugosidade cinemática, no nível alto, ocorre o contrário. Neste caso a probabilidade de existir um maior número de gumes ativos é superior, pois uma maior região da ferramenta desloca-se ao longo do furo, o que possibilita a redução na rugosidade cinemática.

Costata-se, ainda, que a combinação cilindridade inicial das peças com os fatores sobremedida de material e curso da ferramenta, também agem sobre os resultados da qualidade superficial. Apesar de sua influência ser bem menor que a da rotação da ferramenta e levemente inferior a do seu curso, quando analisados isoladamente.

No nível baixo da interação cilindridade e sobremedida acontece uma menor penetração dos gumes abrasivos na superfície que está sendo brunida. Com o aumento do desvio de forma e da sobremedida, nível alto, eleva-se também a pressão de contato e os grãos são forçados a penetrar de maneira mais agressiva na peça, além de um número maior de grãos cinemáticos se fazer presente no processo. Estas são condições ideais para que se estabeleça o aumento de rugosidade da superfície.

• **Remoção** : a influência das variáveis de entrada do processo sobre a remoção de material é mostrada na figura 6.4.



**Figura 6.4** - Relação entre a remoção e as grandezas de entrada

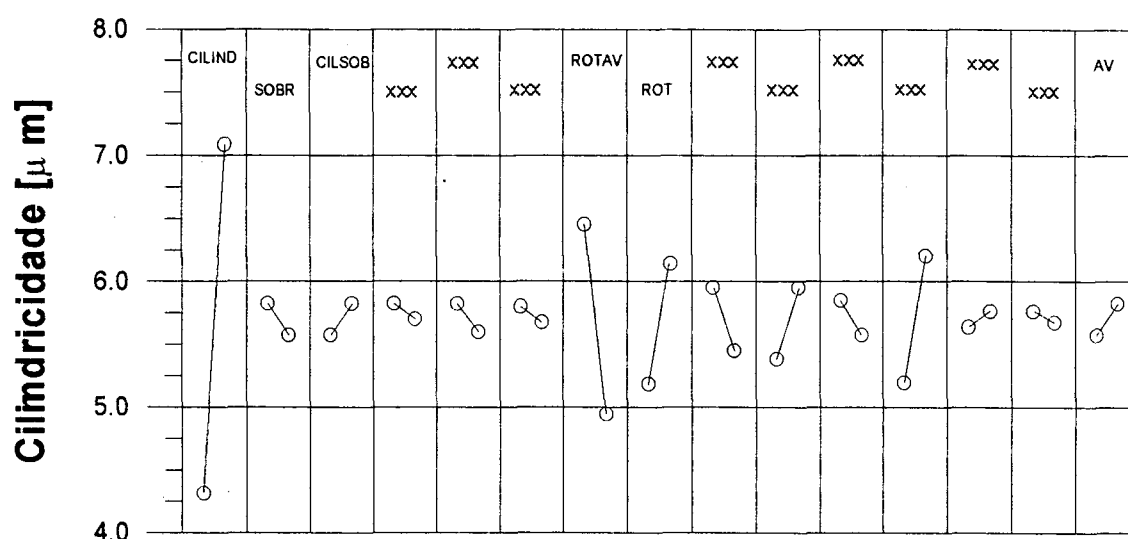
A remoção de material foi exclusivamente influenciada pela sobremedida de material a remover. Neste caso as características geométricas iniciais da peça não atuaram sobre a remoção de material, mesmo porque o campo de sobremedidas do ensaio foi elevado. Como se observou nos ensaios de força, os desvios de forma das peças apresentavam influência nos esforços e em consequência sobre a remoção, somente quando pequenas faixas de sobremedida eram removidas.

#### 6.4.2. Análise dos Resultados da Segunda Etapa

Como se observou na análise dos gráficos apresentados anteriormente, o curso da ferramenta foi o fator dominante sobre os resultados obtidos no brunimento, exceto na remoção de material, onde a sobremedida brunida controlou o processo, sua influência foi sempre observada.

Com base neste fato, serão apresentados novos ensaios nos quais o curso da ferramenta foi otimizado, ou seja, regulado na posição na qual foram obtidos os melhores resultados. A condição ideal deste parâmetro permite analisar a influência dos fatores restantes e então proceder a devida adequação de cada um deles ao processo de brunimento.

• **Cilindricidade** : a influência das variáveis de entrada do processo sobre a cilindridade das peças é mostrada na figura 6.5.



**Figura 6.5** - Relação entre a cilindridade e as grandezas de entrada

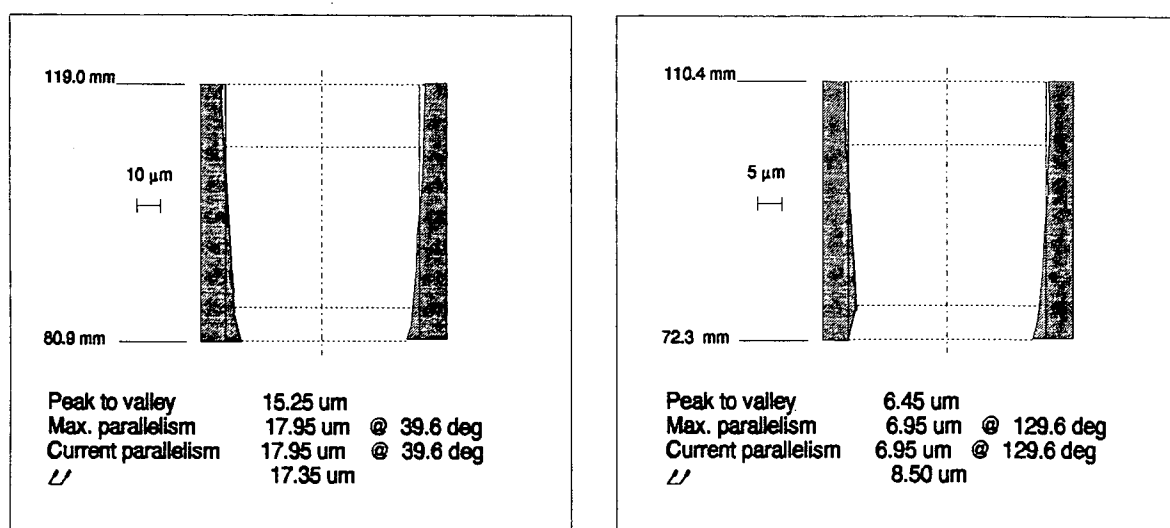
Com o curso otimizado, nota-se que a cilindridade inicial da peças, ou seja, a característica geométrica com que tais peças saem da mandriladora, passa a controlar os resultados relacionados ao desvio de forma.

Peças com menores desvios de forma levam à baixa cilindridade final, do mesmo modo que desvios de forma elevados ocasionam erros de cilindridade maiores, como se observa no gráfico.

Apesar do brunimento de desbaste promover uma elevada redução na cilindridade das

peças, observou-se que o perfil geométrico das mesmas permaneceu semelhante à conferida pelo processo anterior de usinagem. Esta foi uma característica observada quase que na totalidade dos corpos de prova analisados.

A figura 6.6 mostra o perfil e a cilindridade de um corpo de prova antes e após o processo de brunimento.



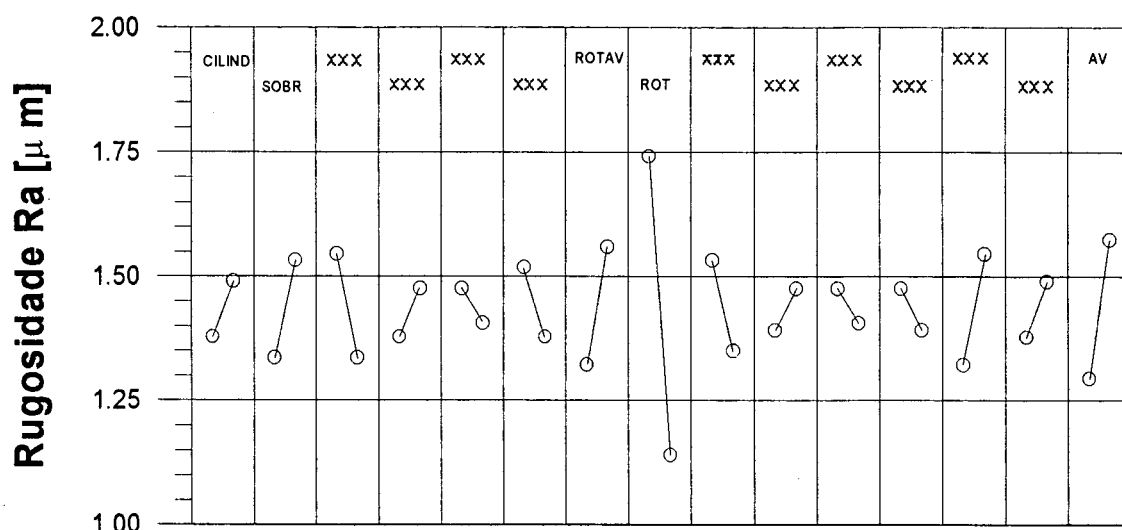
**Figura 6.6** - Cilindricidade de um corpo de prova antes e após o brunimento

A interação da rotação com o avanço apresentou-se como outro fator de influência na cilindridade, contudo de forma menos significativa que o primeiro fator.

No nível baixo dos dois fatores encontraram-se os maiores desvios de forma e, com emprego da rotação e do avanço no nível alto, observou-se uma redução da cilindridade dos corpos brunidos. Este comportamento ocorre porque na primeira situação a composição da velocidade de corte ocasiona um ângulo de cruzamento  $\alpha$  menor que no segundo. Sabe-se que ângulos  $\alpha$  maiores promovem uma elevada remoção e esta é uma condição básica para que haja a diminuição dos erros de cilindridade.

A análise de variância dos fatores que exerceram influência sobre a cilindridade final das peças brunidas nos ensaios está no anexo D.

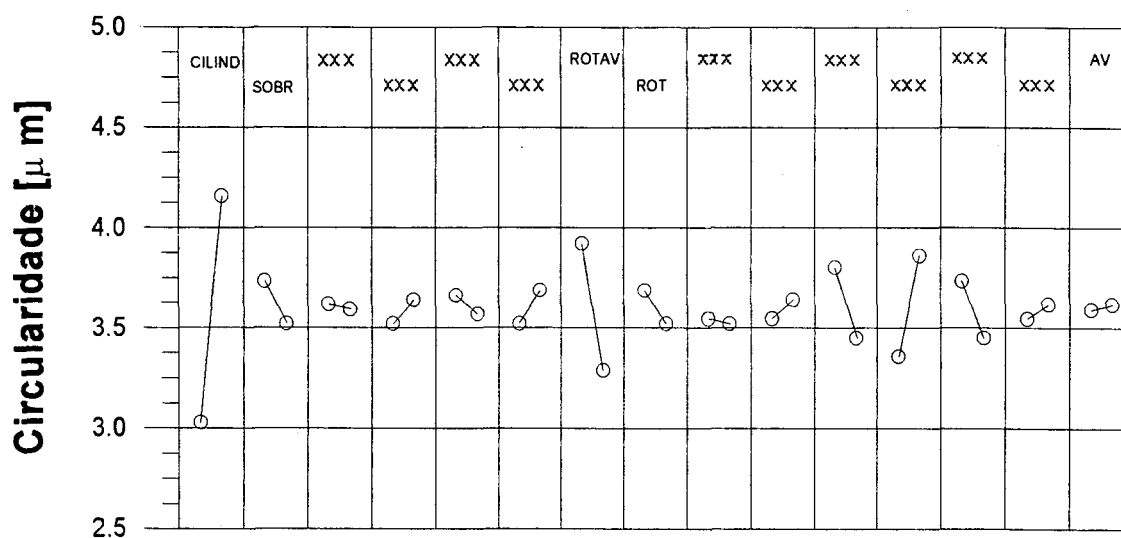
• **Rugosidade** : a influência das variáveis de entrada do processo sobre a rugosidade das peças é mostrada na figura 6.7.



**Figura 6.7** - Relação entre a rugosidade e as grandezas de entrada

Como nos primeiros ensaios, tem-se novamente, uma elevada influência da rotação da ferramenta sobre a rugosidade da superfície brunida. A maior velocidade de corte alcançada quando do emprego de rotações superiores, nível alto, promove uma redução na rugosidade de processo já que os grãos abrasivos atuam um maior número de vezes num mesmo comprimento usinado.

• **Circularidade** : a influência das variáveis de entrada do processo sobre a circularidade das peças é mostrada na figura 6.8.



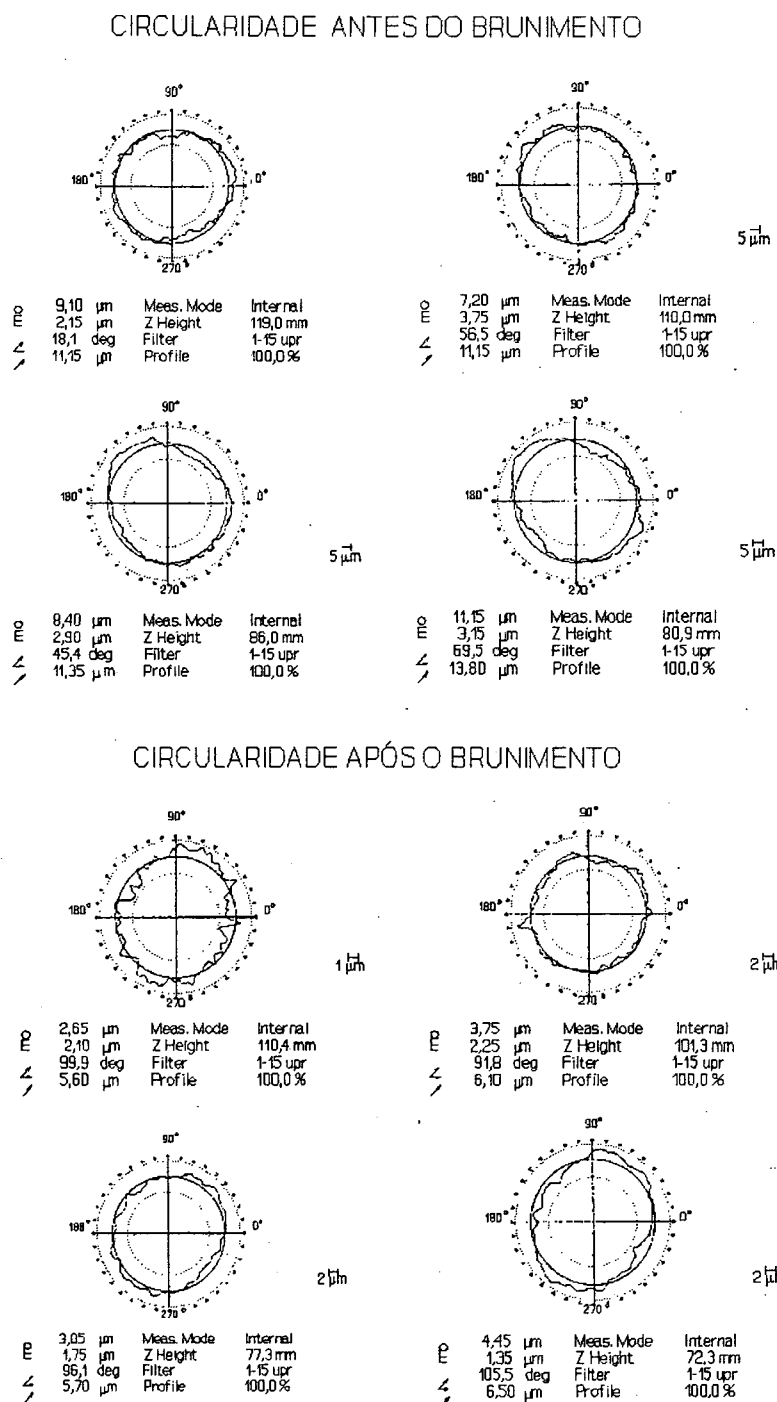
**Figura 6.8** - Relação entre a circularidade e as grandezas de entrada

Antes de se proceder a análise dos gráficos apresentados na figura 6.8, deve-se fazer uma consideração. A influência da circularidade inicial das peças ensaiadas não foi aplicada como uma das variáveis de entrada, apesar deste ser, provavelmente, um dos fatores de maior influência sobre a circularidade final. Esta restrição ocorreu porque seria necessário um elevado número de peças para possibilitar as combinações desejáveis na composição da matriz ortogonal, o que tornou-se impraticável. Contudo, procura-se mostrar como os demais fatores agem sobre esta característica final alcançada com o processo.

Observa-se que o desvio de cilindridade inicial é o fator que domina a circularidade das peças, onde os menores desvios de forma geram peças com melhores características geométricas.

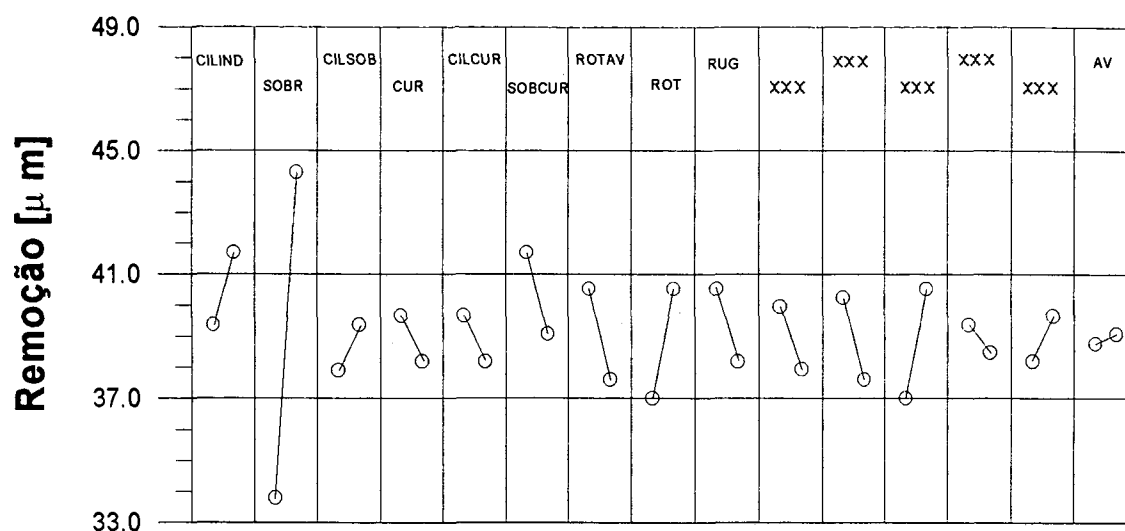
A interação de rotação e avanço atua sobre a circularidade de maneira similar ao que acontece com a cilindridade, onde ângulos de cruzamento maiores possibilitam elevadas remoções e a consequente redução dos desvios de forma. A confiabilidade de que estes fatores sejam os de maior influência é de 99 %, anexo D.

A figura 6.9 mostra o desvio de circularidade medido em quatro seções, para uma das peças, antes e depois do ensaio de brunimento.



**Figura 6.9 - Circularidade de uma peça antes e após o brunimento**

• **Remoção** : a influência das variáveis de entrada do processo sobre a remoção de material é mostrada na figura 6.10.



**Figura 6.10** - Relação entre a remoção e as grandezas de entrada

Analogamente à primeira etapa de experimentos, nesta fase o comportamento da remoção de material foi função exclusiva da sobremedida a usinar e os outros fatores envolvidos no processo não manifestaram-se de forma contundente sobre os resultados.

Neste capítulo observou-se como os resultados do trabalho, no brunimento "Precidor", frente as diversas grandezas de entrada do processo. A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas no trabalho.



# **CAPÍTULO 7**

## **CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS**

Como nos demais processos de usinagem, o brunimento de curso longo "Precidor" apresenta suas particularidades, portanto, o estudo da força de usinagem foi fundamental na análise do comportamento deste processo, ao longo do tempo.

De uma forma generalizada, constatou-se que o perfil das curvas da força de avanço ( $F_f$ ) e do momento torçor ( $M_t$ ) está associado ao deslocamento das diferentes regiões da ferramenta em relação à peça. Mais especificamente, pode-se observar que variações na sobremedida, modificações na forma inicial das peças e diferença na granulometria do abrasivo alteram as características da força e do momento e, por conseguinte, os resultados do processo.

A análise de variância dos resultados obtidos, no brunimento com a ferramenta de granulometria menor (D50), mostrou que na faixa inicial de sobremedidas (1 a  $3.5\mu\text{m}$ ), o fator mais significativo sobre a força de avanço e sobre o momento torçor foi o desvio de forma das peças. No campo que envolveu maiores remoções (4 a  $12\mu\text{m}$ ), a sobremedida de material foi o fator preponderante. Este comportamento tem origem nas pequenas pressões de contato geradas nos baixos níveis de sobremedida. Fator limitante para a penetração dos grãos, o que inibe os fenômenos de corte, salientando entretanto os esforços oriundos do atrito entre as partes. Como o atrito prepondera nesta situação, a forma do desvio geométrico das peças influi diretamente nos níveis de força alcançados. Portanto as peças que possuem um perfil cujo contato com a ferramenta de brunir é menor apresentam esforços de corte reduzidos. Contudo, nas maiores faixas de remoção o desvio de forma das peças passa a ter uma importância relativa, pois a sobremedida de material passa a controlar o processo.

O estudo da dispersão dos dados, tanto da força de avanço, quanto do momento torçor, mostrou que na primeira região dos gráficos, ou seja até aproximadamente  $4\mu\text{m}$  é impossível estabelecer uma tendência de crescimento dos esforços com a sobremedida. Entretanto a partir

deste ponto, apesar de uma divergência de até 20% entre os resultados, o comportamento de crescimento de  $F_f$  e  $M_t$  é nítido.

Tratando-se agora, dos resultados obtidos com a ferramenta de maior granulometria (D150), observou-se que tais resultados são aproximadamente 15 a 60% menores, do que os obtidos com a ferramenta (D50), demonstrando o quanto o atrito influi, principalmente nas pequenas remoções com menores granulometrias. O comportamento geral da força de avanço e do momento torçor, no entanto é muito similar ao apresentado com o uso da ferramenta (D50). Nas baixas remoções de material, a forma inicial é o fator de maior influência sobre os esforços, sendo substituído pela sobremedida quando mais material é removido.

A comparação feita entre os esforços de corte na entrada e na saída da ferramenta na peça mostrou que esta relação aumenta com a elevação da sobremedida de material. Como teoricamente todo o material deveria ser removido em um único passe, o esforço na entrada seria elevado, ao passo que no retorno da ferramenta tenderia a zero. Para faixas de remoção elevada esta é uma verdade, contudo quando pequenas sobremedidas estão envolvidas este comportamento não acontece. Caso a rigidez da ferramenta fosse maior, este efeito poderia ser usado na redução do ciclo, procedendo-se um retorno rápido da mesma.

Na análise da influência das grandezas de entrada sobre os resultados do processo empregou-se as técnicas Taguchi, para o desenvolvimento dos experimentos. Esta estratégia reduziu consideravelmente o número de ensaios a ser realizado, não havendo comprometimento dos resultados visto que tendências esperadas foram obtidas, como é o caso do desvio de forma inicial das peças ser um dos principais fatores de influência sobre a forma final do elemento, mesmo após o seu brunimento.

Duas etapas de ensaios foram executadas, na primeira as variáveis de entrada foram a sobremedida, cilindridade e rugosidade inicial, curso da ferramenta, rotação e avanço, bem como interações entre estes fatores. Observou-se um domínio do curso da ferramenta sobre a cilindridade final das peças, nesta etapa, o qual se deve principalmente a um menor número de grãos ativos nas extremidades da peça quando empregado o menor curso, responsável pelos maiores desvios de cilindridade. Já, a rugosidade foi principalmente influenciada pela rotação

da ferramenta, que está diretamente relacionada à velocidade de corte. Para um mesmo avanço, o aumento da velocidade de corte reduz a rugosidade cinemática da superfície. O curso da ferramenta também foi um fator ativo sobre a rugosidade das peças, onde novamente o número de grãos abrasivos ativos interfere no processo. Quando o curso encontra-se no nível menor, o número de grãos atuantes é reduzido proporcionando uma elevada rugosidade cinemática, no nível elevado do fator ocorre o comportamento contrário. Como esperado, a remoção de material foi exclusivamente influenciada pela sobremedida de material a remover.

Na segunda etapa, partiu-se para um estudo com o curso da ferramenta otimizado, com isto observou-se a influência das demais grandezas de entrada. Verificou-se que a cilindridade final das peças é função da forma que as mesmas possuíam antes do processo de brunimento, ou seja pós-mandrilamento. Observou-se que mesmo após o brunimento, as peças consevaram o perfil inicial, apesar da redução significativa nos valores da cilindridade. Este comportamento está provavelmente relacionado à diferença de volume de material que existe na região inferior dos corpos de prova, isto proporciona a deformação elástica da peça, durante o brunimento, que retorna a posição inicial após este processo.

Como no estudo anterior, a rugosidade das superfícies foi principalmente afetada pela rotação da ferramenta, comprovando que a velocidade de corte tem grande influência sobre este resultado do processo. Nas velocidades mais elevadas, um maior número de grãos atua num mesmo comprimento brunido, ocasionando a redução na rugosidade da superfície.

A circularidade final das peças foi, também, um resultado abordado durante o estudo, apesar deste desvio de forma não ter sido empregado como uma das variáveis de entrada, o que foi explicado anteriormente. Contudo, procedeu-se a análise em relação aos demais fatores e constatou-se que os erros associados à cilindridade inicial acabam por influenciar na circularidade das peças. Menores desvios de cilindridade geraram peças com melhores características geométricas em todos os aspectos.

Neste conjunto de ensaios, novamente a remoção de material esteve ligada unicamente a sobremedida empregada.

A análise dos resultados obtidos neste estudo é bem mais qualitativa do que quantitativa, já que neste primeiro momento pretendia-se uma visão geral e abrangente do brunimento "Precidor". Contudo foi possível estabelecer a tendência de comportamento dos esforços de corte e das grandezas de entrada do processo.

Ainda existe muito o que conhecer e principalmente desenvolver nesta área, espera-se no entanto que este primeiro passo auxilie na execução de futuras pesquisas, bem como seja fonte de orientação para os trabalhos elaborados na indústria.

Ficam, então, as sugestões para os novos trabalhos:

- Estudar a rigidez das ferramentas, na tentativa de desenvolvimento de um sistema que possibilite o recuo rápido, aproveitando-se a característica de baixos níveis de força (tendendo a zero) durante a saída da ferramenta de brunimento.
- Verificar como os desvios de forma se comportam em relação aos erros iniciais das peças, nas três etapas do processo, já que neste trabalho verificou-se apenas a etapa de desbaste.
- Desenvolver um estudo direcionado aos erros de forma gerados após o processo de mandrilamento, pois é neste ponto que se situa a origem dos principais erros verificados após o brunimento das peças.
- Realizar um estudo orientado à fabricação de superfícies platafórmicas, as quais são facilmente obtidas com o brunimento "Precidor". Com este trabalho pode-se obter os parâmetros ideais para a fabricação destas superfícies, altamente empregadas, bem como insumos para a sua qualificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HAASIS, Gerhard. Honen. In: SPUR, G. , STOEFERLE, TH **Handbuch der Fertigungstechnik-spanen**. Muechen : Carl Hanser, 1980. V. 3, t. 2, p. 294-365
  
- [37] HAASIS, G, **New Honing Potentialities with diamont tools**. In: PROCEEDINGS OF INDUSTRIAL DIAMOND CONFERENCE, 19--, Oxford. Anais... London: Industrial Diamond Information Bureau, 19--. p. 37-50
  
- [3] HAASIS, Gerhard. **Dornhonen gewinnt neue Anwendungsgebiete**. 11. ed. Nuertingen: NAGEL, 1989.
  
- [4] GRIEB, P, **Honing with borazon CBN metal bond stones**. Illinois: General Eletric, 1978. não paginado.
  
- [5] YOKOYAMA, K., ICHIMIYA, R., IWATA, K et al. **Analyses of thermal deformation of workpiece in honing process: dynamic expansion pressure of honing stone during honing**. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., v.21, n.2, p. 119-124, june 1987
  
- [6] TRIMATE. **Il primo sistema per rodare fori soto 0,0005 in automatico**. Bologna: Trimate, 19--. não paginado.
  
- [7] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Schielfen, Honen und Läppen**. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI, 1989. v. 2, 381 p.
  
- [8] KLINK, U. **Fachgebiete in Jahresübersichten: Honen**. VDI-Z, v. 125, n. 14, p. 595-603, jul. 1983.

- [9] NUSSBAUM, Guillaume. **Rebolos & abrasivos: Tecnologia básica**. São Paulo, Ícone. 1988. 503p.
- [10] HAASIS, Gehard. Nicht nur Hilfsmittel. **Maschinenmarkt Industriejournal**, v. 78, n. 86, okt. 1973.
- [11] YOKOYAMA, K, ICHIMIYA, R. **Analyses of thermal deformation of workpiece in honing process: temperature distribution, honing force and expansion pressue of honing stone**. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., v. 17, n. 4, p. 247-252, 1983.
- [12] SOCIETY OF MANUFATURING ENGINEERS. **Tooll and Manufacturing Engineers Handbook: Materials, Finishing and Coating**. 4. ed. Dearborn: One S.M.E. Drive, 1983. v 3
- [13] STEMMER, Caspar E., **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis, Editora da UFSC. 1993. 326p.
- [14] HAASIS, Gerhard. **Nicht nur Hilfsmittel**. Maschinenmarkt Industriejournal, v. 78, n.86, não paginado, okt. 1973.
- [15] ZURAWSKI, W., SIMPFENDÖRFER, D. **Stand der Technik in der Feinbearbeitung**. VDI-Z, v. 127, n.23/24, p. 957-964, dez. 1985.
- [16] HILLE, Luiz, FIGUEIREDO, Geraldo J., CONRAD, Sergio L. **Brunimento**. Joinville: EMBRACO, 1990. 94 p. Apostila.
- [17] YEGENOGLU, K., HAAN, M. R. **Dornhonen - Alternative Bohrungsbearbeitung**. Werkstatt und Betrieb, p.561-564, jul. 1987.

- [18] KLINK, U. **Fachgebiete in Jahresübersichten: Honen**. VDI-Z, v. 128, p. 83-93, feb. 1966.
- [19] SELL, Sílvio R., **O que é brunir**. [S.l.:S.n.], [19--], não paginado.
- [20] ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GmbH & Co. **Informações de nosso setor técnico**.
- [21] VICTOR, H. R., MÜLLER, M., OPFERKUCH, R. **Spanende Fertigungsverfahren II. Teil 4** : Honen Werkzeuge. Werkstattstechnik, v. 72, n. 6, p. 347-349, 1983.
- [22] KUEHN, K. -D. **Schleif-, Hon-, Laepp-und Poliermaschinen** . wt Werkstattstechnik, v.81, p. 543-546, 1991.
- [23] ELECTROCHEMICAL honing. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals handbook**. 8. ed. Ohio : Metals Park, 1976. p. 285-299.
- [24] HAASIS, Gerhard. **Kunzhubhonen mit Stein und mit Band**. In: HAASIS, Gerhard. Vorlesungsreihe : Spanede Fertigungstechnik, 1993. p. 1-51.
- [25] PEMANO HONING. **High precision honing**. Le Landeron: Pemamo Honing Phosa. [19--] não paginado.
- [26] HAASIS, Gerhard, WIDMANN, R. **Dornhonen gewinnt neue Anwendungsgebiete**. wt Werkstattstechnik, v. 79, p. 431-435, 1989.
- [27] YOKOYAMA, K., ICHIMIYA, R., IWATA, K et al. **Analyses of thermal deformation of workpiece in honing process: thermal effects due to heat capacity of workpiece and kind of honing stone**. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., v.21, n.1, p. 43-48, mar.1988.

- [28] H. R. MUELLER, M. OPFERKUCH, R. **Spanede Fertigungsverfahren II Teil 5: Honen.** Werkzeuge. Werkstattstechnik, v.72, n. 6, p. 347-349.
- [29] HAASIS, Gerhard, WIDMANN, R. **Neue Vorrichtungskonzepte beim Langhub und Domhonen.** Werkstatt und Betrieb, v. 124.
- [30] HAASIS, Gerhard. **Developments in honing and superfinishing techniques.** 13. ed. Nuertingen: NAGEL, 1987.
- [31] HABERLAND, R. **Abbildung von Maschinenschwingungen bei der Ultrapraezisionsbearbeitung.** Feinwerktechnik & Messtechnik, v. 97, n. 6, p. 250-254, 1989.
- [32] KLINK, U. **Honen.** VDI-Z, v.131, n.9, p.94-102, 1989.
- [33] HAASIS, Gerhard. **Möglichkeiten der Optimierung beim Honen.** Werkstatt und Betrieb, v. 108, n. 21, p. 95-107, 1975.
- [34] SALJE, E., MUSHARDT, H., **Untersuchungen über den Prozessablauf beim Innenrundhonen anhand von Zerspankraftmessungen.** VDI-Z, v.125, n. 12, p. 471-474, juni 1983.
- [35] MACHINING DATA HANDBOOK. **Machinability Data Ceter**, 3. ed. Cincinnati, 1980, v.1, p. 377-392.
- [36] YOKOYAMA, K., ICHIMUIYA, R., IWATA, K. et al. **Analyses of thermal deformation of workpiece in honing process: dynamic expansion pressure of honing stone during honing.** Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., v.21, n.2, p. 119-124, june 1987.



- [37] SALJÉ, E., MUSHARDT, H., BRAUNSCHWEIG, S., **Honen von Automobilzylindern. Schleifen, Honen, Läppen und Polieren.** Verfahren und Maschinen. 54. Ausgabe. Vulkan-Verlag. Essen. pg 327-338. 1987.
- [38] JUCHEM, H. O., **Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstuecken mit Diamant und CBN.** Duesseldorf: De Beers Industrie-Diamanten, 1986. 15p.
- [39] VICTOR, H. R., MÜLLER, M., OPFERKUCH, R. **Spanende Fertigungsverfahren II Teil 5** : Honen. Kinematik, Kenngrößen. Werkstattstechnik, v.72, n.7, p. 405-407, 1983.
- [40] BOOR, U. **Kühlschmierstoffe zun Honen.** VDI-Z, v. 131, n.61, p. 74-79, jun. 1989.
- [41] NAGEL. **Darstellung des Langhubhonens.** Nürtingen. [S.L.:S.N], não paginado.
- [42] VICTOR, H. R., MÜLLER, M., OPFERKUCH, R. **Spanende Fertigungsverfahren II. Teil 6** : Honen. Kenngrößen. Werkstattstechnik, v.72, n.9, p.538-540, 1983.
- [43] YANAMOTO, Akira, MATSUMORI, N, UEDA, T. **Cutting characteristics of splintery grains and its utilization: investigation by honing.** Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., v. 11, n 2, pg. 85-90, june 1977.
- [44] ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GmbH & Co. **Informações de nosso setor técnico.**
- [45] BOOR, U. **Kühlschmierstoffe zum Honen.** VDI-Z, v.131, n. 51, p. 70-75, jun. 1989.
- [46] MESQUITA, N. G. de M., **Análise e Escolha de uma Superfície Segundo sua Função e Fabricação.** Florianópolis: UFSC, 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica). UFSC.

- [47] BOEHS, L. **Análise de Superfícies Usinadas**. Florianópolis: UFSC, 1993. Apostila. paginação irregular.
- [48] LEAL, L. da C. M. **Tribologia**. Florianópolis: 77 p. Apostila.
- [49] ZURRIN, R. **Variables Langhubformhonen**: Einsatzmöglich-keiten und Grezen. Werkstattstechnik, v. 80. p. 619-624, 1990.
- [50] MOTGOMERY, D. C. **Design and Analyse of Experiments**. 3 ed. John Wiley and Sons. 1991. paginação irregular.
- [51] NAGEL DO BRASIL. **Máquina de brunir, preparada para brunir a peça compressor**, conf. des. São Paulo : NAGEL, 1983.
- [52] ROSS, P. J. **Aplicação das Técnicas Taguchi na Engenharia de Qualidade**. 1ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1991. 333p.
- [53] METALS HANDBOOK. **Properties and Selection of Metals**. 8 ed. Ohio, 1961. v. 1. 1300 p.
- [54] Gonçalves, A. A. **Metrologia: Parte 1**. Florianópolis : UFSC. Apostila. não paginado.
- [55] WEULE, H. **Improved Honing Through Process-Control**. Annais of the CIRP, v. 37, p. 339-342, jan. 1986.
- [56] SALJÉ, E. SEE, M. von. **Process-Optimization in Honing**. Annais of the CIRP, v. 36, p. 235-239, jan. 1987.

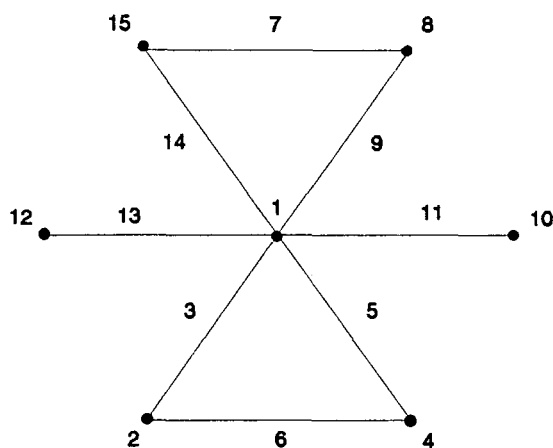
- [57] SALJÉ, E., PAULMANN, R., **Relations between Abrasive Processes**. Annals of the CIRP, v. 37, p. 641-647, jan. 1988.
- [58] FLORES, Gehard. **Bürsten Gehonter Oberflächen**. VDI-Z, v. 128, n.11, p. 439-442, jun. 1986.
- [59] HAASIS, Gehard. **Spanende und abtragende Verfahren der Feinbearbeitung**, Stuttgart: Universität Stuttgart, 1993.
- [60] HAASIS, G., **Langhubhonen**. [s.l.: s.n.], 19--. 52p.

## ANEXO A

### • Arranjo ortogonal L16

COLUNA															
ENSAIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

### • Gráfico linear do arranjo ortogonal L16



## ANEXO B

### • Características dos equipamentos auxiliares

#### Plataforma piezelétrica

- fabricante: Kistler Instrumente AG

- modelo: 9263

	Ff	Mt
- faixa de medição:	-5 a 20 kN	-100 a 100 N.m
- sinal mín. de resposta:	0,02 N	0,02 N.cm
- sensibilidade:	-1,94 pC/N	1,65 pC/N.cm
- linearidade:	<± 1 % FSO	<± 1 % FSO
- histerese:	<± 1 % FSO	<± 1 % FSO

#### Amplificador de sinais

- fabricante: Kistler Instrumente AG

- modelo: 5006

- faixa de medição: ± 10 a 500.000 pC

- sensibilidade: -0,1 a 11.000 pC/un. mecânica

- impedância de entrada: ≈ 100 TΩ

- faixa de frequência: 0 a 180 kHz

- precisão: <± 1 %

- linearidade: <± 0,5 %

- sinal parasita do cabo:  $-3 \times 10^{-5} \text{ pC}_{\text{RMS}} / \text{pF}$

- temperatura de utilização: 0 a 50°C

**Analizador de sistema de controle**

- "control system analyzer"
- fabricante: Hewlett-Packard
- modelo: HP 3563 A

**Rugosímetro ( cabeçote )**

- fabricante : Perthometer
- modelo :
- trajetória de deslocamento : 1.5 - 60mm
- precisão de deslocamento :  $\pm 0.2 - 60\text{mm}$
- velocidade de apalpamento :  $0.5 - 0.1 \text{ mm/s} \pm 5\%$
- velocidade de retorno : 1.5 mm/s
- posicionamento vertical :
  - grossoiro : 135mm, -20 para a superfície estabelecida
  - fino: 20 mm, através do parafuso de posicionamento
- posicionamento horizontal :
  - grossoiro : através do botão correspondente
  - fino : botão para posicionamento fino
- ajuste de inclinação:
  - $\pm 1^\circ$  , através do parafuso de posicionamento fino

**"Plotter"**

- fabricante: Hewlett-Packard
- modelo: HP Color Pro

**Máquina de medir por coordenadas**

- fabricante : ZEISS

- modelo : 850

- faixa de medição :

850 mm/x

1200 mm/y

600 mm/z

- forças de medição : 0.1; 0.2; 0.4; 1.0 (N)

- velocidade de deslocamento : 0 - 5mm/s

- massa admissível 600 Kg

- condições ambientais:

temperatura permitida : 5° até 35° C

umidade : 40 até 60%

## ANEXO C

### • Resultados dos ensaios da força de avanço com a ferramenta D150

ENSAIO									
Caso 1	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
2,00	4.79	6.63	6.58	7.01	8.34	9.51	43.86	7.14	1.62
3,00	7.73	7.94	8.07	8.69	9.13	9.58	51.54	8.59	0.86
4,00	7.59	8.78	8.81	9.47	10.59	11.02	56.62	9.44	1,17
Totais yj	43.82		48.63		58.57		151.02		
Caso 2	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
6.00	13.06	14.38	15.63	16.90	17.02	17.55	94.54	15.76	1.75
9.00	31.05	33.50	33.75	35.04	36.00	37.24	206.58	34.43	3.17
13.00	33.97	35.41	14.24	37.73	39.99	45.88	230.65	38.44	4.20
16.00	55.23	57.94	37.67	59.73	61.12	67.08	359.45	59.91	4.03
23.00	75.37	77.19	58.35	84.00	87.20	88.54	493.35	83.06	5.38
30.00	108.30	110.04	80.05	116.56	118.07	123.73	687.17	114.53	5.52
Totais yj	645.44		686.88		738.42		2070.74		

### • Tabela de análise de variância da força de avanço com a ferramenta D150

Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	16.14	2	8.07	19.63	4.26	38994.55	5	7798.91	1129.31	3.11
Des form.	18.86	2	9.43	23.94	4.26	361.64	2	180.82	26.18	3.89
Sob x Des	1.15	4	0.29	0.70	3.63	60.33	10	6.03	0.87	3.75
Erro	3.70	9	0.41			83.87	12	6.91		
Total	39.85	17				39499.39	35			



• Tabela da dispersão dos dados da força de avanço com ferramenta D150

C a s o	Sobre- medida	Dispersão ( P=95%, t=1,96)		
		Minima	Média	Máxima
1	3.00	3.92	7.14	11.36
	3.00	6.36	8.59	10.82
	4.00	6.39	9.44	13.48
2	6.00	11.65	15.76	19.87
	9.00	29.34	34.43	39.52
	13.00	28.58	38.44	48.30
	16.00	50.44	59.91	69.37
	23.00	69.42	83.06	94.70
	30.00	101.56	114.53	127.50

• Resultados dos ensaios de força de avanço com ferramenta D50

ENSAIO												
Caso 1	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	yi..	yim	s
1,00	8.53	9.15	9.74	10.80	10.91	11.65	13.73	13.01	14.37	100.89	11.21	1,92
1,50	8.82	9.32	9.83	10.51	10.91	13.67	13.34	13.58	14.71	103.69	11.52	2,10
2,00	8.92	10.34	10.40	11.82	13.61	13.62	13.80	13.40	14.72	107.63	11.96	1.79
2,50	9.57	10.15	11.31	11.62	13.42	13.44	13.12	13.92	15.92	110.50	13.28	1,94
3,00	9.75	9.79	11.10	11.89	13.83	13.94	14.23	14.90	16.57	115.00	13.78	2,35
3,50	11.20	13.63	13.93	13.41	13.71	13.72	14.89	15.64	16.80	124.93	13.88	1,68
Totais yj	183.48			220.48			258.68			663.64	13.27	
Caso 2	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2		3	4		5	6		yi..	yim	s
4,00	13.55	13.81		14.24	14.42		15.83	17.53		87.38	14.56	1.88
6,00	18.94	19.20		21.00	21.99		23.88	25.32		129.33	21.56	3.40
8,00	25.44	27.90		29.30	29.58		31.27	37.08		180.57	30.10	3.94
12,00	39.89	43.11		44.27	47.10		47.10	51.71		274.76	45.79	4.23
Totais yj	199.84			221.90			250.30			673.04	28.00	

• Tabela de análise de variância da força de avanço com ferramenta D50

Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	41.71	5	8.34	11.23	3.48	3258.44	3	1086.15	61.06	3.49
Des form.	157.10	2	78.55	105.70	3.26	159.98	2	79.99	4.50	3.89
Sob x Des	3.51	10	0.35	0.47	3.11	14.75	6	3.46	0.14	3.00
Erro	26.75	36	0.74			213.44	12	17.79		
Total	229.07	53				3471.89	23			

• Tabela da dispersão dos dados de força de avanço com ferramenta D50

	Sobre-medida	Dispersão ( P=95%, t=1,96)		
		Mínima	Média	Máxima
C a s o  1	1.00	6.69	11.21	15.73
	1.50	6.58	11.52	16.47
	3.00	7.76	11.96	16.16
	3.50	7.71	13.28	16.84
	3.00	7.26	13.78	18.29
	3.50	9.93	13.88	17.83
C a s o  2	4.00	9.68	14.56	19.45
	6.00	15.31	21.56	27.80
	8.00	19.86	30.10	40.33
	13.00	34.80	45.79	56.79

• Resultados dos ensaios de momento torçor com ferramenta D150

ENSAIO									
Caso 1	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
2,00	20.26	26.75	33.76	34.86	39.48	39.50	193.61	33.27	7.56
3,00	27.72	31.14	36.03	36.40	41.01	43.74	216.04	36.01	5.66
4,00	30.57	41.15	43.79	48.90	49.17	51.34	264.92	44.15	7.66
Totais yj	177.59		233.74		264.24		674.57		
Caso 2	Desvio A		Desvio B		Desvio C		Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	yi..	yim	s
6.00	58.96	65.76	74.54	87.35	90.03	97.73	474.37	79.06	15.09
9.00	168.29	175.23	181.59	199.15	207.26	218.97	1150.49	191.75	19.81
13.00	348.96	361.38	377.41	384.62	395.23	427.57	2295.17	383.53	27.55
16.00	406.06	410.21	428.96	445.79	453.37	459.00	2603.23	433.90	23.41
23.00	536.84	548.98	573.87	580.08	630.17	654.29	3523.23	587.21	46.04
30.00	679.86	708.15	713.09	770.62	776.50	783.17	4430.39	738.40	43.65
Totais yj	4468.68		4815.07		5193.29		14477.04		

• Tabela de análise de variância do momento torçor com ferramenta D150

Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	443.19	2	221.60	19.12	4.26	1784137.16	5	356827.43	1157.39	3.11
Des form.	641.22	2	320.61	27.67	4.26	21891.56	2	10945.78	35.50	3.89
Sob x Des	10.76	4	3.69	0.23	3.63	3699.63	10	394.52	1.28	3.75
Erro	104.29	9	11.59			3699.63	12	308.30		
Total	1199.46	17				1813673.50	35			

• Tabela da dispersão dos dados de momento torçor com ferramenta D150

C a s o	Sobre- medida	Dispersão ( P=95%, t=1,96)		
		Mínima	Média	Máxima
1	3.00	13.61	33.27	51.93
	3.00	20.52	36.01	51.49
	4.00	24.25	44.15	64.06
2	6.00	43.59	79.06	114.53
	9.00	145.19	191.75	238.31
	13.00	317.79	383.53	477.27
	16.00	381.23	433.90	486.56
	23.00	479.00	587.21	695.41
	30.00	635.81	738.40	840.98

• Resultados dos ensaios de momento torçor com ferramenta D50

ENSAIO												
Caso 1	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	yi..	yim	s
1,00	10,79	10,78	11,86	12,02	12,63	13,31	14,93	15,04	15,37	116,73	12,97	1,80
1,50	12,87	12,97	13,01	13,28	14,01	14,55	15,47	16,68	19,59	132,43	14,71	2,24
2,00	12,27	13,02	13,73	14,61	16,54	17,47	18,59	18,72	19,73	144,68	16,08	2,75
2,50	12,94	16,69	16,78	17,18	17,61	17,95	18,34	18,37	18,55	154,41	17,16	1,72
3,00	13,99	16,24	16,34	17,67	17,75	17,94	20,73	21,12	23,05	163,83	18,20	2,63
3,50	16,03	17,15	17,18	17,84	18,71	18,85	19,04	20,31	22,74	167,85	18,65	1,99
Totais yj	254,64			298,82			335,37			879,93	16,30	
Caso 2	Desvio A			Desvio B			Desvio C			Totais	Média	Desvio
Sobrem.	1	2		3	4		5	6		yi..	yim	s
4,00	20,05	21,03		21,19	21,47		23,79	25,76		133,29	23,22	3,13
6,00	29,33	30,03		31,08	34,95		36,17	39,17		200,73	33,46	3,92
8,00	55,17	56,13		58,03	60,74		63,41	65,01		358,49	59,75	3,98
12,00	73,24	75,99		78,75	82,51		83,43	87,13		481,05	80,18	5,14
Totais yj	360,97			388,72			423,87			1173,56	48,90	

• Tabela de análise de variância do momento torçor com ferramenta D50

Análise de Variância										
	Caso 1					Caso 2				
	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab	S.S.	G.L.	Var (V)	Teste F	F Tab
Sobrem.	211.79	5	43.36	37.61	3.48	12278.70	3	4093.90	1299.29	3.49
Des form.	181.99	2	91.00	80.79	3.26	248.82	2	124.21	39.43	3.89
Sob x Des	14.82	10	1.44	1.28	3.11	24.32	6	4.05	1.29	3.00
Erro	40.55	36	1.13			37.80	12	3.15		
Total	448.75	53				12589.24				

• Tabela da dispersão dos dados de momento torçor com ferramenta D150

	Sobre-medida	Dispersão ( P=95%, t=1,96)		
		Mínima	Média	Máxima
C a s o  1	1.00	8.75	13.97	17.19
	1.50	9.45	14.71	19.98
	3.00	9.62	16.08	23.53
	3.50	13.10	17.16	21.21
	3.00	13.02	18.20	24.38
	3.50	13.98	18.65	23.32
C a s o  2	4.00	16.67	23.22	27.76
	6.00	23.27	33.46	43.64
	8.00	49.41	59.75	70.09
	13.00	66.81	80.18	93.54

## ANEXO D

• Tabela de análise de variância para a cilindricidade na primeira etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	23.56	23.56	<u>21.24</u>
SOBREM	1	45.56	45.56	<u>43.48</u>
CILSOB	1	0.06	0.06	
CUR	1	588.06	588.06	<u>553.47</u>
CILCUR	1	7.56	7.56	7.12
SOBCUR	1	30.6	30.6	3.88
ROTAV	1	10.56	10.56	9.94
ROT	1	39.06	39.06	<u>38.76</u>
XXX	1	1.56	1.56	
RUG	1	3.06	3.06	3.88
XXX	1	10.56	10.56	9.94
XXX	1	18.06	18.06	<u>17.00</u>
XXX	1	5.06	5.06	4.76
AV	1	23.56	23.56	<u>21.24</u>
ERRO	3	3.19	1.06	
TOTAL	15	778.94	51.93	

• Tabela de análise de variância para a cilindricidade na segunda etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	5.0513	5.0513	<u>307.2618</u>
SOBREMED	1	0.2093	0.2093	<u>13.7318</u>
XXX	1	0.0053	0.0053	0.3197
XXX	1	0.0638	0.0638	3.8782
XXX	1	0.0410	0.0410	3.4944
XXX	1	0.1541	0.1541	9.3711
ROTAV	1	1.6965	1.6965	<u>103.1964</u>
ROT	1	0.3938	0.3938	<u>23.9517</u>
XXX	1	0.0827	0.0827	5.0279
XXX	1	0.5148	0.5148	<u>31.3150</u>
XXX	1	0.9950	0.9950	<u>60.5250</u>
XXX	1	0.4865	0.4865	<u>29.5936</u>
AV	1	0.0028	0.0028	
ERRO	3	0.0493	0.0164	
TOTAL	15	9.7432	0.6495	

• Tabela de análise de variância para a rugosidade na primeira etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	0.0009	0.0009	
SOBREM	1	0.0016	0.0016	
CILSOB	1	0.2116	0.2116	<u>251.4059</u>
CUR	1	0.2756	0.2756	<u>327.4752</u>
CILCUR	1	0.2450	0.2450	<u>291.1188</u>
SOBCUR	1	0.0000	0.0000	
ROTAV	1	0.0650	0.0650	<u>77.2574</u>
ROT	1	0.4356	0.4356	<u>517.5445</u>
XXX	1	0.0289	0.0289	<u>34.3366</u>
RUG	1	0.0729	0.0729	<u>88.6139</u>
XXX	1	0.0361	0.0361	<u>43.8911</u>
XXX	1	0.0650	0.0650	<u>77.2574</u>
XXX	1	0.0042	0.0042	5.0198
AV	1	0.0156	0.0156	<u>18.5644</u>
ERRO	3	0.0025	0.0008	
TOTAL	15	1.4588	0.0973	

• Tabela de análise de variância para a rugosidade na segunda etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	0.0564	0.0564	1.5140
SOBREMED	1	0.1871	0.1871	5.0208
XXX	1	0.1785	0.1785	4.7913
XXX	1	0.0410	0.0410	
XXX	1	0.0298	0.0298	
XXX	1	0.1008	0.1008	3.7058
ROTAV	1	0.2377	0.2377	6.3790
ROT	1	1.4460	1.4460	<u>39.8124</u>
XXX	1	0.1580	0.1580	4.2411
XXX	1	0.0248	0.0248	0.6658
XXX	1	0.0138	0.0138	0.3706
XXX	1	0.0410	0.0410	
XXX	1	0.2139	0.2139	5.7415
XXX	1	0.0473	0.0473	1.2698
AV	1	0.2943	0.2943	7.8995
ERRO	3	0.1118	0.0373	
TOTAL	15	0.2047	0.2047	

• Tabela de análise de variância para a sobremedida na primeira etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	0.563	0.563	
SOBREM	1	370.562	370.562	<u>1185.800</u>
CILSOB	1	18.062	18.062	<u>57.800</u>
CUR	1	23.526	23.526	<u>73.200</u>
CILCUR	1	27.526	27.526	<u>88.200</u>
SOBCUR	1	53.562	53.562	<u>168.200</u>
ROTAV	1	5.063	5.063	16.200
ROT	1	0.063	0.063	
XXX	1	27.562	27.562	<u>88.200</u>
RUG	1	33.062	33.062	<u>105.800</u>
XXX	1	10.562	10.562	<u>33.800</u>
XXX	1	18.062	18.062	<u>57.800</u>
XXX	1	76.563	76.563	<u>245.000</u>
AV	1	1.563	1.563	5.000
ERRO	2	0.625	0.313	
TOTAL	15	669.437	44.629	

• Tabela de análise de variância para a sobremedida na segunda etapa de ensaios

Tabela de Análise de Variância				
FATOR	G.L.	SS	MS	F
CILIND	1	138.0625	138.0625	<u>47.9783</u>
SOBREMED	1	451.5625	451.5625	<u>155.9353</u>
XXX	1	10.5625	10.5625	3.6475
XXX	1	10.5625	10.5625	3.6475
XXX	1	14.0625	14.0625	4.8561
XXX	1	115.5625	115.5625	<u>39.9085</u>
ROTAV	1	39.0625	39.0625	<u>13.4892</u>
ROT	1	39.0625	39.0625	<u>13.4892</u>
XXX	1	39.0625	39.0625	<u>13.4892</u>
XXX	1	18.0625	18.0625	6.2374
XXX	1	33.0625	33.0625	<u>11.4173</u>
XXX	1	45.0625	45.0625	<u>15.7338</u>
XXX	1	5.0625	5.0625	
AV	1	0.0625	0.0625	
ERRO	3	8.8875	3.8958	
TOTAL	15	988.9375	64.1958	